VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Výroba modelů standardních a speciálních tvarových nástrojů pro výukové účely aditivní technologií 3D tisku

Production Models of Standard and Special Shaped Cutting Tools for Educational Purposes by Additive Technology of 3D Printing

Autor práce: Barbora Prokopová

Vedoucí práce: Ing. Marek Pagáč, Ph.D.

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Zadání bakalářské práce

Student: **Barbora Prokopová**

Studijní program: B2341 Strojírenství

Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie

Téma: Výroba modelů standardních a speciálních tvarových nástrojů pro výukové účely aditivní technologií 3D tisku
Production Models of Standard and Special Shaped Cutting Tools for Educational Purposes by Additive Technology of 3D Printing

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Rozbor problematiky a současný stav.
3. Návrh postupu výroby nástrojů (výběr nástrojů a úprava modelů).
4. Metody dokončovacích úprav povrchu.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

[1] GIBSON, I, D ROSEN a B STUCKER. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing.* New York: Springer, c2010, xxii, 459 p. ISBN 1441911200.
[2] Krassenstein, edie. *You Can Now See the First Ever 3D Printer — Invented by Chuck Hull — In the National Inventors Hall of Fame [online].*
[3] Bastian, A. *How to Evaluate the 2015 Make: 3DP Test Probes.* [on-line] 2015 [cit. 2015-10-27]. Dostupné z: http://makezine.com/2014/11/07/how-to-evaluate-the-2015-make-3dp-test-probes/
[4] Internetové zdroje 3d-tisk.cz, 3dhubs.com, thingiverse.com, aj.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marek Pagáč, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015
Datum odevzdání: 16.05.2016

doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA fakulta strojní

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 16.5.2016 ....Podgorová Barbora.....

podpis studentky

Prohlašuji, že

- jsem byla seznámena s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.

- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO") má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).

- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.

- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.

- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠBTUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 16.5.2016

Prokopová Barbora
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Barbora Prokopová

Adresa trvalého pobytu autora práce: Papírenská 787
Paskov 739 21

Poděkování

Touto cestou bych ráda poděkovala vedoucímu své bakalářské práce, panu Ing. Markovi Pagáčovi, Ph.D., za jeho čas, trpělivost, cenné rady, podněty a odborné vedení jak při vypracování teoretické části práce, tak při práci na 3D tiskárně. Děkuji také panu Alešovi Koutnému a firmě Walter za spolupráci a zapůjčení 3D tiskárny.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

PROKOPOVÁ, B. *Výroba modelů standardních a speciálních tvarových nástrojů pro výukové účely aditivní technologií 3D tisku: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2016, 62 s. Vedoucí práce: Pagáč, M.

První část bakalářské práce je zaměřena na přehled všech technologií aditivní výroby. Detailněji jsou vypracovány technologie fotopolymerizace, tisk kovových prášků, směřované nanášení materiálu a plošné laminování. U každé technologie je popsán proces výroby. Druhá část se zabývá postupem výroby plastových modelů speciálních řezných nástrojů firmy Walter na stolních 3D tiskárnách. V práci je uvedený jejich stručný popis, použitý materiál a celkový postup při výrobě modelů nástrojů. Výstupem této bakalářské práce jsou modely speciálních nástrojů, vyrobených na zakázku firmou Walter, vytvořené technologií modelování tavným uložením (FDM).

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

PROKOPOVÁ, B. *Production Models of Standard and Special Shaped Cutting Tools for Educational Purposes by Additive Technology of 3D Printing : Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2016, 62 p. Thesis head: Pagáč, M.

The first part of the thesis is focused on an overview of all additive manufacturing technologies. Technologies of Vat Photopolymerization, Powder Bed Fusion, Directed Energy Deposition and Sheet Lamination are reported in details. There are described production processes of each of these technologies. The second part deals with the production of special tools models of the company Walter, made with a 3D printer for educational purposes. There are described 3D printers and the materials used, and the general process of model making tools. The outcome of this work is real models of special tools custom made by Walter, made by Fused Deposition Modeling (FDM).

Obsah

Seznam použitého značení, symbolů a zkratek

Značka	Význam
3D	Three-Deposition
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren – termoplastický materiál
AM	Additive Manufacturing – aditivní výroba
CAD	Computer Aided Design – počítačem podporované konstruování
CAM	Computer Aided Manufacturing – počítačem podporovaná výroba
CO_2	Oxid uhličitý
DDM	Direct Digital Manufacturing – přímá digitální výroba
DLP	Digital Light Processing – digitální světelné zpracování
DMD	Direct Metal Deposition – přímé kovové nanášení
DMLS	Direct Metal Laser Sintering – přímé kovové laserové spékání
DSM	Direct Sand Molds – tisk pískových norem
DWS	StereoLithography Digital Wax System – Stereolitografie pomocí digitálního voskového systému
EB	Electron Beam – elektronový paprsek
EBAM	Electron Beam Additive Manufacturing – AM elektronovým paprskem
EBF	Electron Beam Freeform Fabrication – volné zpracování elektronovým paprskem
EBM	Electron Beam Melting – tavení elektronovým paprskem
EFAB	Ultra-precision Freeform metal manufacturing technology – Ultra-přesná netradiční kovová výrobní technologie
FCP	Fast Ceramic Production – tisk keramických modelů
FDM	Fused Deposition Modeling – modelování tavným uložením
FFF	Fused Filament Fabrication – výroba tavným vláknem
FTI	Film Transfer Imaging – vrstvený přenos zobrazování
HIPS	High Impact Polystyrene – polystyren
LCD	Liquid Crystal Display - displej z tekutých krystalů

LCM	Lithography-based Ceramic Manufacturing – litografie na bázi keramické výroby
LENS	Laser Engineered Net Shaping – laserové inženýrství síťového tvarování
LED	Light Emitting Diode – svítivá dioda
LMF	Laser Metal Fusion – tisk kovového prášku
LOM	Laminated Object Manufacturing – výroba vrstvené součásti
MLB	Micro Light Build – ultrafialové zařízení
M-SLA	Micro StereoLithography – Micro-Stereolitografie
PA6	Polyamid – nylon
PC	Polycarbonate - polykarbonát
PET-G	Polyethylene terephthalate-glycol – polyetylénterefталát-glykol
PLA	Polylactic acid – kyselina polymléčná
ppm	Parts per milion – částic na jeden milion
PRT	Pro/Engineer part file – datový souboru Pro/Engineer
PVA	Polyvinyl alcohol – polyvinylalkohol
RP	Rapid Prototyping – rychlé prototypování
SD	Secure Digital – paměťová karta
SHS	Selective Heat Sintering – selektivní tepelné spékání
SLA/SL	StereoLithography – stereolitografie
SLM	Selective laser melting – selektivní laserové tavení
SLS-M	Selective Laser Sintering-Metals – selektivní laserové spékání kovů
SLS-P	Selective Laser Sintering-Plastics – selektivní laserové spékání plastů
STL	StereoLithographic data format – stereolitografický datový formát
UAM	Ultrasonic Additive Manufacturing – ultrazvuková aditivní výroba
USB	Universal Serial Bus – univerzální datová sběrnice
UV	Ultra Violet – ultrafialové zařízení

ÚVOD

Aditivní výroba může být pro lidstvo velkým krokem k lepší budoucnosti. Může lidem usnadnit práci v odvětvích strojního průmyslu, letectví, kosmického průmyslu, anebo dokonce zachránit životy a ulehčit práci doktorům ve zdravotnictví. 3D tisk jako takový, byl ještě do nedávna pro spoustu lidí nepředstavitelný. Této problematice se zatím v České republice nevěnuje taková pozornost, jakou by si zasloužila.

Technika se postupem času stále zdokonaluje, a tím jsou kladeny větší nároky na konstruktéry, projektanty a celkově na technické firmy. Konkurence na trhu je vysoká a každý malý krok může rozhodovat o zisku či ztrátě financí ve firmě. 3D tisk by mohl být pro firmy krokem dopředu. Ať už se jedná o tisk prototypů nebo daných součástí.

První část bakalářské práce se zaměřuje na přiblížení různých technologií, které existují k vytvoření 3D objektů pomocí aditivní výroby. Další část této práce je založena na spolupráci s firmou Walter, která se zabývá výrobou různých typů kvalitních řezných nástrojů. Firma Walter představuje své nástroje na různých přednáškách, tiskových konferencích, kde předvádí nové trendy v oblasti řezných nástrojů. Firma ve spolupráci s Katedrou obrábění, montáže a strojírenské metrologie projevila zájem vytvořit tvarově komplikované nástroje prostřednictvím 3D tiskárny z lehčího materiálu – plastu. Pomocí aditivní výroby se vytiskla přesná replika nástroje, která je lehčí, lépe se převáží, je cenově dostupná a bude sloužit pro výukové účely.

1 Úvod do problematiky 3D tisku

1.1 Aditivní výroba

Aditivní výroba je proces, který vytváří trojrozměrné objekty postupným nanášením jednotlivých vrstev určitého materiálu, a tím vytváří model podle CAD předlohy. Jednou z výhod je, že při této technologii nevzniká žádný odpad. [9]

1.1.1 Postup aditivní výroby

Pokud mluvíme o 3D tisku jako takovém, je to vlastně jen jeden z několika procesů aditivní výroby. Aditivní výroba má 7 základních kroků k vytvoření požadovaného 3D objektu:

1. **Vytvoření 3D modelu objektu** – 3D model se provádí v CAD softwarech;
2. **Konverze STL** – CAD soubor je převeden do formátu STL. Model je digitálně rozkrájen do vrstev;
3. **Přenos souboru STL do 3D tiskárny** – soubor STL se přenáší pomocí USB, SD karty nebo WiFi;
4. **Nastavení stroje a umístění objektu na platformě** – stroj je nastaven tak, aby bylo možné tisknout ekonomicky, tzn. maximalizace úspor nákladů a snížení odpadu materiálu. Je nutné zkontrolovat umístění a velikost objektu na stavební platformě;
5. **3D tisk –** stroj řízený počítačem vytváří jednotlivé vrstvy. Tloušťka vrstvy určuje výslednou kvalitu výrobku a jeho vzhled. Čím menší tloušťka vrstvy, tím přesnější a kvalitnější povrch objektu;
6. **Odstranění objektu a očištění –** po vytvoření modelu a použitém chlazení a vytvrzení může být model odstraněn ze stroje. Stroj je nutno očistit od přebytečného materiálu;
7. **Následné zpracování –** vytištěné objekty mohou obsahovat podpůrné struktury, které je nutno odstranit. Dále se používají dokončovací úpravy (viz kapitola 3) pro přesnější a kvalitnější povrch součásti. [8]-[54]

1.1.2 Využití aditivní výroby

V současnosti dochází k širokému využití aditivních technologií v celé řadě oborů lidské činnosti. Předpokládá se, že mají tyto technologie velikou budoucnost a zároveň dojde k širokému rozšíření i pro domácí uživatele s klesající pořizovací a provozní cenou aditivních technologií.

Aditivní výroba může pomoct v problematice kosmického výzkumu – možnost výroby náhradních dílů, nebo výroba nových přístrojů během pobytu ve vesmíru bez využití pozemské infrastruktury. Dále například pro výrobu zbraní nebo potravin. Důležité zastoupení mají v oboru zdravotnictví pro výrobu zubních náhrad, protéz končetin, implantáty čelistí apod. Velké zastoupení mají i v dopravním průmyslu, architektuře a strojírenství. [9]

1.1.3 Rozdíl mezi AM a RP

Často kladený dotaz je na to, jaký je rozdíl mezi aditivní výrobou a rychlým prototypováním. Z historických důvodů existuje mnoho výrazů používaných k popisu tzv. vrstva po vrstvě (layer-by-layer) výrobních technologií. Můžeme znát např. layered manufacturing, rapid prototyping, solid freeform fabrication, rapid tooling, direct writing, additive manufacturing nebo 3D printing. RP byl nejpoužívanější výraz, protože se tyto technologie používaly nejčastěji k výrobě prototypů. Postupem času vznikalo mnoho nových procesů a každý z nich byl jedinečně pojmenován pro snadné rozlišení, i když všechny tyto technologie byly založeny na stejném principu. To vedlo k terminologické složitosti a nejednoznačnosti. Aditivní výroba byla konečně přijata jako uznávané jméno pro všechny procesy. Toto bylo jasně stanovené ve standardní terminologii pro aditivní výrobní technologie. [11]

1.2 FFF/FDM technologie

Výroba tavným vláknem (FFF), také známá jako modelování tavným uložením (FDM), je relativně nová metoda rychlého prototypování (RP). Pracuje na stejném principu jako všechny aditivní metody výroby – nanášením materiálu ve vrstvách. Plastové vlákno nebo kovový drát je odvíjen z cívky a roztavený je dodáván k výrobě součásti. [12]

Značné výhody této metody jsou sledovány v materiálových nákladech, ve výrobní rychlosti a flexibilitě při projektování. Jsou zde ale i nevýhody, a to například nepřesnost. [13]

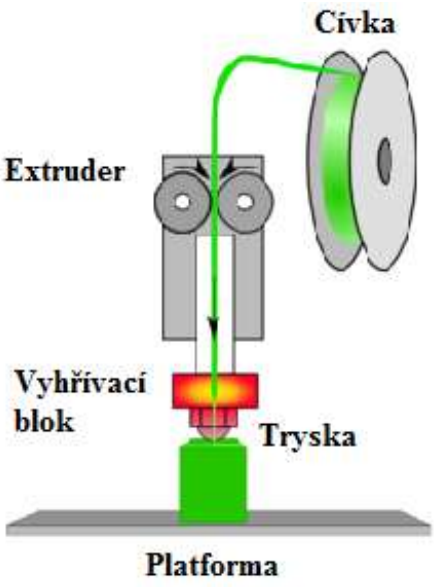
1.2.1 Historie

Technologii FDM vytvořil S. Scott Crump v roce 1980, ale dostupná byla až v roce 1990. Termín modelování tavným uložením (FDM) byl vytvořen, největším světovým výrobcem 3D tiskáren, společností Strarasys a termín výroba tavným vláknem (FFF) byl vytvořen členy RepRap. RepRap je mezinárodní komunitní projekt 3D tiskárny vyvíjené na principu otevřeného hardwaru – tzv. open source. [12]

1.2.2 Proces

FDM pracuje se softwarem, který zpracovává soubor STL, matematicky krájí a orientuje model pro proces výroby. Pokud je to nutné, mohou být generovány nosné konstrukce v případech, kdy není část modelu spojena s podložkou. Stroj může použít jeden materiál k vytvoření modelu a další rozpustný materiál na nosné konstrukce, nebo by bylo možné použít více barev stejného typu termoplastu na ten samý model.

Model, nebo jeho část, jsou vyrobeny vytlačováním malého zploštělého řetězce roztaveného materiálu na podložku a svým pohybem ve dvou osách postupně nanáší velmi tenkou vrstvu materiálu v rovině horizontálního průřezu budoucího výrobku, a tím dojde k vytvoření vrstvy. Po nanesení celé vrstvy se podložka sníží o tloušťku vrstvy ve vertikální ose a postupné nanášení pokračuje nanovo až do vytvoření celého produktu. Materiál se vytvrzuje bezprostředně po vytlačení z trysky. Plastové vlákno nebo kovový drát se odvíjí z cívky spotřebního materiálu a vytlačuje se tryskou řízenou rychlostí. Tryska se zahřívá, aby roztavila materiál. Termoplasty se zahřívají na teplotu skelného přechodu a pomocí vytlačovací hlavy se vytváří vrstva. Tryska sleduje dráhy nástroje řízené pomocí softwaru počítačem podporované výroby (CAM). Krokové motory jsou obvykle použity pro pohyb vytlačovací hlavy. Princip technologie FDM je znázorněný na obrázku 1. [12]



Obrázek 1: Technologie FDM [13]

1.2.3 Využití

FDM metoda se používá pro rychlou výrobu prototypů. Rychlé prototypování usnadňuje iterativní testování a kvůli velmi krátké době výroby může být tato metoda levná alternativa. Pří výrobě se používají materiály, které mají dobrou tepelnou odolnost – např. ABS, Absi, polykarbonát (PC), Ultem 9085. Ultem 9085 rovněž vykazuje zpomalování vzplanutí, takže je vhodný pro letecký a kosmický průmysl. Metoda FDM je také používána v lékařském odvětví. [12]

1.3 Tiskové materiály

V současné době existuje široká škála různých typů materiálů. Například platina, zlato, stříbro, drahé pozlacené kovy, pevné a pružné plasty, mosaz, bronz, ocel, plnokrevný pískovec, porcelán, hliník, dokonce i potraviny nebo biologické materiály pro celou řadu zdravotních aplikací, jako například tisk živých orgánů. V bakalářské práci se zaměříme na ty nejznámější a nejpoužívanější materiály, jejichž materiálové vlastnosti jsou porovnány v tabulce 1 a tiskové teploty v tabulce 2. [14]

Tabulka 1: Porovnání materiálů [15]

	Pevnost v tahu	Houževnatost	Teplota průhybu
ABS	33 MPa (4 700 psi)	106 J/m	204 °F
Nylon	48 MPa (7 000 psi)	200 J/m	207 °F
PLA	50 MPa (7 250 psi)	80 J/m	150 °F
PC	68 MPa (9 800 psi)	53 J/m	280 °F

Tabulka 2: Tiskové teploty materiálů [10]

	Tisková teplota
ABS	220 - 250 °C
PLA	190 - 210 °C
PET-G	230 - 250 °C
PC	250 - 270 °C
NYLON	240 - 260 °C
FLEX	190 - 220 °C
PVA	190 - 200 °C
HIPS	220 - 260 °C
LAYWOOD	170 - 185°C

ABS

ABS je jeden z nejpoužívanějších plastových materiálů pro 3D tisk metodou extruze polymeru, včetně technologie FDM. Jeho výhodou je tuhost, odolnost proti nízkým i vysokým teplotám a chemikáliím (kyseliny, uhlovodíky, oleje). Díly z ABS je možné lepit rozpouštědlovými a polyakrylátovými lepidly. Jeho velkou výhodou je nejnižší závislost na přesném nastavení tiskové hlavy, odolnost výtisků a přijatelný sklon ke kroucení. Přesto tento materiál nelze doporučit pro běžný tisk velkých objektů, tedy objektů přesahujících svým nejdelším rozměrem 80 mm. ABS je dodávána v základní bílé barvě a v několika barevných kombinacích. Vzhledem k nejvyšší tiskové teplotě – (240–250) °C – lze tento materiál snadno opracovávat broušením, vrtáním a ostatními běžnými technikami. Po použití základního nástřiku na plasty je samozřejmě možné i lakování finálního výrobku do požadovaného odstínu. Při tisku je vždy třeba tisknout na základní mřížku, protože i menší objekty mají tendenci se snadno odtrhnout od platformy. [10]

PLA

PLA plast je dalším z nejpoužívanějších materiálů a je standardní pro prototypování metodou FDM. Ve srovnání s materiálem ABS je snadněji a rychleji zpracovatelný při stejných výchozích podmínkách, nicméně výrobky z něj jsou výrazně méně odolně vůči vyšším teplotám – začíná měknout již kolem 60 °C. Na rozdíl od ABS není PLA tolik náchylné k deformacím a vadám vlivem chladnutí vytištěného materiálu, nevyžaduje tedy striktně použití vyhřívané podložky. Z materiálového hlediska jsou výrobky z PLA oproti ABS méně pružné a mají vyšší lesk. Jeho největší předností je nepatrný sklon ke kroucení, daný minimálním rozpínáním při tavení. I při nižších teplotách je výtisk pevný a jednotlivé

vrstvy kvalitně spojené. Po tisku lze i tento materiál opracovávat běžnými postupy, nicméně díky nízkému tavnému bodu je nelze dobře například strojně brousit. Brusný papír strojní brusky materiál rychle zahřeje až k bodu měknutí. Tuto nevýhodu lze pochopitelně odstranit chlazením materiálu při opracování. Ruční broušení je možné prakticky bez omezení, materiál lze i dobře vrtat či lakovat (samozřejmě po ošetření základní barvou pro tvrdé plasty). [10]

PET-G (T-GLASE)

Materiál PET-G je v podstatě stejný jako materiál PET, ze kterého se vyrábí plastové PET-láhve. PETG je proti ostatním tiskovým materiálům odolnější vůči kyselinám a rozpouštědlům. Samozřejmostí je, že materiál není toxický, takže může být používán i jako obalový materiál u potravin. 3D tisk je složitější a pomalejší. [16]

PC

PC je v současnosti zřejmě nejtvrdší materiál, který mohou FFF/FDM 3D tiskárny používat. Nevýhodou tohoto materiálu je delší doba měknutí a tudíž je nutné buď výrazně zvýšit teplotu tisku, anebo hodně zpomalit celý tisk. Díky tomu je 3D tisk s tímto materiálem složitější a pomalý. [16]

PA6 – NYLON

PA6 se hodí pro tisk modelů, u kterých je očekávaná vyšší pružnost při zachování vysoké pevnosti. Nevýhodou tohoto materiálu je špatná přilnavost k další vrstvě modelu a díky tomu může docházet k rozpadu modelu na jednotlivé vrstvy. 3D tisk je velmi obtížný a pomalý. [16]

FLEX

Tento velmi pružný materiál se hodí pro tisk modelů, které mají představovat produkty z gumy. Můžete si z něj vytisknout např. gumové těsnění či gumovou podrážku boty. Díky pružnosti materiálu je však 3D tisk složitější a poměrně pomalý. [16]

PVA

PVA je nový materiál vyvinutý pro tvorbu podpůrných konstrukcí, které jsou rozpustné ve vodě. PVA od většiny výrobců má však špatnou přilnavost k ostatním materiálům a velmi nízkou teplotu varu, proto je tisk s tímto materiálem velmi složitý. Navíc tento materiál vstřebává vzdušnou vlhkost a velmi rychle měkne. [16]

HIPS

HIPS (polystyren) je materiál, který se výborně hodí pro tisk podpůrných konstrukcí. Je však nutné mít 3D tiskárnu se dvěma tiskovými hlavami (extrudery). Jedna hlava tiskne vlastní model a druhá tiskne podpůrné konstrukce, které se následně rozpustí. [16]

LAYWOOD

Tento materiál se snaží imitovat dřevo, takže vytištěné modely připomínají dřevěné výrobky. Materiál obsahuje větší pevné části a díky tomu může docházet k ucpání trysky (zvlášť trysek s menším průměrem). Výsledný model je velmi křehký, takže se nehodí pro modely s tenkými částmi. [16]

2 Technologie 3D tisku

Od roku 2010, americká společnost pro testování a materiály (ASTM) vytvořila soubor norem, které klasifikují aditivní výroby do 7 kategorií podle standardní terminologie. [47]

1. Nastřikování pojiva – Binder Jetting
2. Nastřikování materiálu – Material Jetting
3. Vytlačování materiálu – Material Extrusion
4. Fotopolymerizace – Vat Photopolymerization
5. Tisk práškových materiálů – Powder Bed Fusion
6. Směřované nanášení materiálu – Directed Energy Deposition
7. Plošné laminování – Sheet Lamination

V této práci se zaměříme detailněji na fotopolymerizaci, tisk kovového prášku, směřované nanášení materiálu a plošné laminování.

2.1 Nastřikování pojiva – Binder Jetting

Nastřikování pojiva je aditivní výrobní proces, při kterém je kapalné vazebné činidlo selektivně nanášeno a slouží k přilnutí práškových částic. Touto metodou můžeme tisknout různé materiály, jako jsou například kovy, písky nebo keramika. Výhodou této technologie je možnost tisknout velmi velké objekty. [48]

Metody:

- Nepřímý 3D tisk (Indirect 3D Printing),
- DoD (Drop-on-Demand).

2.2 Nastřikování materiálu – Material Jetting

Tento proces je podobný tradičnímu inkoustovému tisku dokumentů, ale místo tryskání kapek inkoustu, se tryskají kapky tekutého fotopolymeru na platformu, kde se kapky ochladí. Tisková hlava pomocí trysek současně vytváří jednotlivé vrstvy a poté jsou pomocí UV záření vytvrzené. Používají se polymery nebo vosky vzhledem k jejich viskozitě a schopnosti tvořit kapky. [49]-[50]

Metody:

- Přímý 3D tisk (Direct 3D Printing),
- Polyjet,
- MJP-CJP (MultiJet Printing, ColorJet Printing),

- DMP (Direct Metal Printing),
- Inkjet MM (Inkjet Model Maker),
- RPBO-DIW (Rapid Prototyping Robotic Dispensing-Direct Ink Writing),
- HVIP (High Viscosity Inkjet Printing),
- MPP (Metal Printing Process).

2.3 Vytlačování materiálu – Material Extrusion

Vytlačování materiálu je proces, při kterém je materiál nasáván skrz trysku, kde se ohřívá a je pokládán na platformu v postupných vrstvách. Tryska se pohybuje ve vodorovném směru a platforma ve svislém směru. Jedná se o běžnou techniku, která se používá na mnoha levných, domácích, hobby tiskárnách. Materiál ve formě cívky se podává přes trysku pod stálým tlakem a v nepřetržitém proudu, a proto tento tlak musí být stabilní. [51]

Metody:

- FDM-FFF (Fused Deposition Modeling- Fused Filament Fabrication),
- PJP (Plastic Jet Printing),
- Bioplotting-Bioprinter,
- DRCP (Dermal Repair Construct Printer),
- Direct Write,
- WDM (Wax Deposition Modeling),
- 3DFD (3D Fibredeposition),
- MEM (Melted and Extruded Modeling),
- LDM (Liquid Deposition Modeling).

2.4 Fotopolymerizace – Vat Photopolymerization

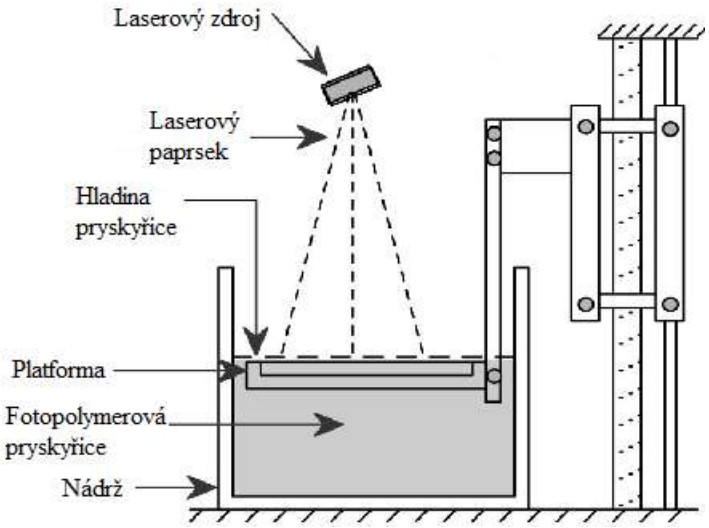
Metoda 3D tisku používaná k vytištění 3D objektů pomocí fotopolymerizace. Fotopolymerizační proces je proces, při kterém se vyrábí prototypy fotopolymerové pryskyřice (akrylátové nebo epoxidové) vytvrditelné gama zářením, rentgenovým zářením, elektronovými paprsky nebo ultrafialovým zářením (UV) v rozsahu vlnových délek kratší než má viditelné světlo, kdy dojde ke změně skupenství z kapalného na pevné.

3D tiskárna využívá technologií digitálního zpracování světla, která funguje jako projektor. Obraz dané vrstvy objektu je promítán ultrafialovým světlem na sud s kapalnými polymery. Promítá se vrstva po vrstvě až je objekt kompletní. [1]

2.4.1 SLA – Stereolitografie

SLA technologie má vysokou přesnost a vytváří hladký povrch. Tolerance rozměrů vytvořeného objektu se často pohybují okolo 0,05 mm. S ohledem na úroveň kvality SLA, je zvláště užitečná pro vytváření vysoce přesných licích forem (například pro vstřikování, lití a vakuové lití), stejně jako pro funkční prototypy nebo prezentační modely.

Tato metoda pracuje na principu vytvrzování epoxidové nebo akrylátové pryskyřice pomocí UV laseru. Ke stavbě modelu dochází tedy postupným vytvrzováním 2D vrstev fokusovaným laserem. Objekt je tvořen na platformě, která pak klesne o tloušťku jedné vrstvy, část je potažena novou vrstvou pryskyřice pomocí stírací lišty a postaví se další vrstva. Tento proces se opakuje, dokud není součást dokončena. Když je součást úplná, čistí se v roztoku rozpouštědla k odstranění mokré pryskyřice, která zbyla na povrchu součásti. Poté je objekt vložen do UV pece, kde se vytvrdí. Princip metody SLA je znázorněný na obrázku 2. [55]-[56]



Obrázek 2: Technologie SLA [56]

2.4.2 M-SLA – Micro-Stereolitografie

M-SLA proces je podobný technologii SLA, kde jsou vrstvy fotopolymeru vytvrzovány působením záření. M-SLA je ale mnohem rychlejší, a to zejména při tisku velkých objektů.

Uvnitř tiskového stroje je světelný zdroj o příslušné vlnové délce vyzařující rovnoměrné, kolimované světlo směrem k vrstvě tekutých krystalů, které jsou schopny propouštět nebo zachytit dopadající záření. Světlo prochází panelem z tekutých krystalů, dopadne na hladinu pryskyřice a dochází k jejímu okamžitému vytvrzení. Vytvrzení vrstvy trvá pouhých 2–5 sekund, bez ohledu na velikost a složitost objektu. Centrální procesorová jednotka v tiskárně

posílá pro každou vrstvu novou masku vzoru na panel z tekutých krystalů, a tímto způsobem se vytvoří objekt. [57]

2.4.3 DWS – Stereolitografie pomocí digitálního voskového systému

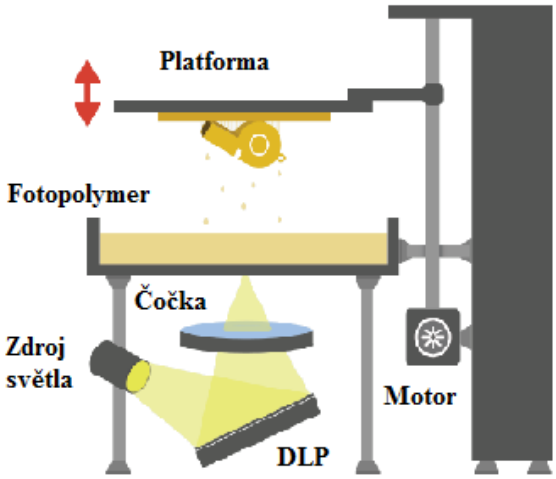
Výhodou této metody je vysoká přesnost a velmi hladký a čistý povrch vytvořených objektů. DWS se používá v průmyslovém a zdravotním odvětví a k výrobě šperků.

Nádrž je naplněna tekutou pryskyřicí, která se vytvrzuje pomocí laserového paprsku, který je umístěn pod nádrží. Objekt je tvořen na platformě vzhůru nohama, a proto se nemusí používat podpůrné struktury. Platforma klesne k hladině pryskyřice, laser vykreslí průřez dané vrstvy, tím se pryskyřice vytvrdí a platforma vyjede nahoru. Takto se tvoří postupné vrstvy, dokud není objekt hotový.

2.4.4 DLP – Digitální světelné zpracování

U této metody je podobný proces jako u stereolitografie (SL metod) v tom, že pracuje s fotopolymery. Hlavním rozdílem je zdroj světla. DLP používá více konvenční zdroje světla, jako je oblouková lampa se zobrazovacím panelem z tekutých krystalů nebo digitální micro-zrcadlové zařízení (DMD – Digital Micro-mirror Device), které je aplikováno na celý povrch nádrže fotopolymerové pryskyřice v jednom průchodu, takže je zpravidla rychlejší než metody SL. [2]

Jedna z mnoha výhod je, že také jako metody SL, metoda DLP vyrábí vysoce přesné díly s vynikajícím rozlišením. Další výhodou je, že obrobek je zavěšen vzhůru nohama z platformy a to umožňuje lepší kontrolu procesu, a tudíž lepší rovnoměrnost, celistvost a menší tloušťky vrstvy. Další velkou výhodou je to, že se používají pryskyřice pro usnadnění procesu, což má za následek méně odpadu a nižší provozní náklady. Princip technologie DLP je znázorněný na obrázku 3. [2]



Obrázek 3: Technologie DLP [2]

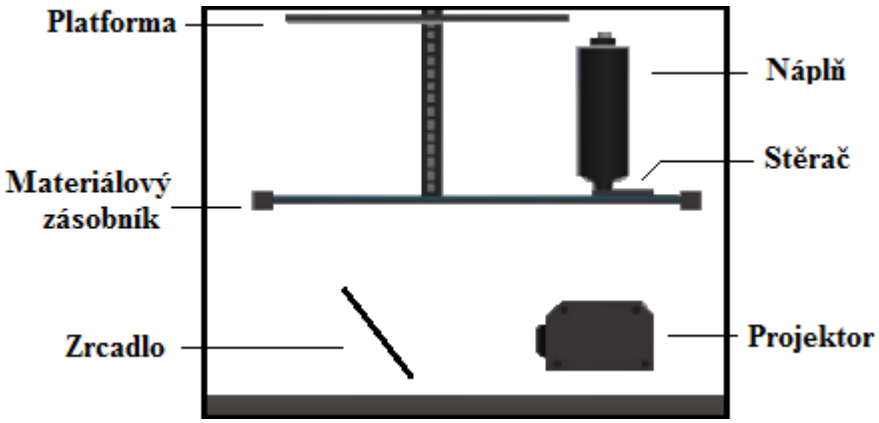
2.4.5 Moving DLP – Pohyblivé digitální světelné zpracování

Je to fotopolymerozací způsob výroby prototypů nebo funkčních částí. Model je tvořen postupným kladením vrstev fotosenzitivní epoxy, akryláty nebo kompozitní pryskyřice za působení vysoké intenzity ultrafialového laseru. Pohyblivé DLP velmi vysokého rozlišení přejíždí na povrchu pryskyřice po celé ploše, a tak vzniká polymerizace. Jakmile jedna vrstva materiálu ztuhne, platforma klesne na hodnotu tloušťky následující vrstvy a nová část tuhne. Tímto způsobem se opakuje pokládání tolika vrstev, kolik je potřeba k dosažení plného objemu součásti.

Jako materiál se používá PLASTCure ABS. Tento materiál i tuto technologii přivedla na trh firma Prodways. Výhodou této technologie je vysoká přesnost na všech 3 osách, vysoká produktivita a nejnižší náklady na jeden díl a tisk je 10x rychlejší než jiné technologie na trhu. Tato technologie se používá nejčastěji pro marketingové prezentace, pro výrobu funkčních částí nebo výrobu zubních protéz. [3]

2.4.6 FTI – Vrstvený přenos zobrazování

Stírací lišta aplikuje vrstvu tekutého a světlocitlivého materiálu na materiálový zásobník a poté se pryskyřice vytvrzuje speciálním UV projektorem. Proces se opakuje až do vytvoření celého 3D modelu. V průběhu budování vrstev je obrobek pevně vzhůru nohama na stavební desce. Výhodou této technologie je široká škála výběru barev a trvanlivost materiálu. 3D objekty mají velmi hladký povrch a hezky tvarované oblouky. Princip technologie FTI je znázorněný na obrázku 4. [4]



Obrázek 4: Technologie FTI [4]

2.4.7 LCM – Litografie na bázi keramické výroby

Technologie je založena na selektivním vytvrzení fotosenzitivní pryskyřice, která obsahuje homogenně dispergované (rozptýlené) keramické částice. Jádrem procesu je speciálně navržený zobrazovací systém, který umožňuje přenos informací o vrstvě pomocí nejnovější LED-technologie. Tato inovativní zobrazovací technika spolu se speciální projekční optikou dokonce umožňuje výrobu malých konstrukcí a velmi jemné detaily. [6]

Fotopolymery jsou páteří vytvářeného dílu v průběhu výrobního procesu. Působí jako pojivo mezi keramickými částicemi. Vytvrzení se provádí při teplotách okolního prostředí a tím může být zabráněno tvoření tepelných napětí. [6]

Tato technologie se používá nejčastěji v oblasti elektroniky, strojírenství, ale i v lékařském inženýrství. [5]

2.5 Tisk kovových prášků – Powder Bed Fusion

Metody tohoto procesu využívají buď laserový, nebo elektronový paprsek k roztavení a sloučení materiálu, který je ve formě prášku. U všech metod tohoto tisku se musí aplikovat a zarovnávat práškový materiál. Existují různé mechanismy, které tento prášek aplikují, a to například váleček nebo nůž. Násypka nebo nádrž s posouvající spodní stranou zajišťují přívod nového materiálu. [52]

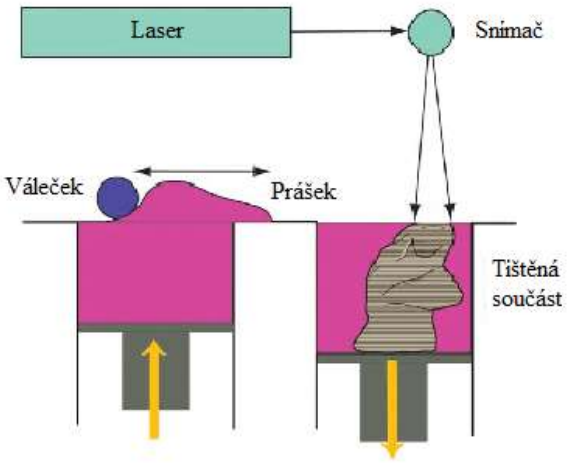
2.5.1 SLS-P – Selektivní laserové spékání plastů, SLS-M – Selektivní laserové spékání kovů

Selektivní laserové spékání je jedna z technologií rychlého prototypování. Mohou se vyrábět funkční mechanické spoje. Tato metoda má schopnost produkovat několik kusů

najednou, a proto je dobrou volbou pro přímou digitální výrobu (DDM) produktů, které vyžadují pevnost a tepelnou odolnost.

Technologie používá vysoce výkonné lasery (CO_2 laser), k fixaci plastových nebo kovových částic prášku. Systém se skládá z laseru, části komory a kontrolního systému. Část komory je složena ze stavební platformy, zásobníku s práškem a nivelačního válečku. Tenká vrstva materiálu se rozprostírá na platformě, kde laser spéká materiál. Platforma pak klesne o tloušťku jedné vrstvy a nivelační váleček uhlazuje prášek po celé stavební platformě, kde je další průřez spékán k předchozí vrstvě. Tento proces (viz obrázek 5) se opakuje až do dokončení celého požadovaného 3D modelu.

Jakmile je model kompletní, odstraní se z části komory samotný model i zbytky nepoužitého sypkého materiálu a vyčistí se všechny plochy. Nosnou část vytváří nesintrovaný prášek, který obklopuje díly během zpracování. [17]



Obrázek 5: Technologie SLS [18]

2.5.2 SHS – Selektivní tepelné spékání

Selektivní teplené spékání je typ aditivního výrobního procesu, který je nejlepší pro výrobu levných prototypů pro vyhodnocení koncepce a funkčního testování. Tato technologie je velmi podobná selektivnímu laserovému spékání (SLS). Hlavním rozdílem je, že SHS využívá tepelné tiskové hlavy namísto laseru, a díky tomu je tato technologie levnějším řešením. [19]

Válec aplikuje vrstvu termoplastického prášku přes vyhřívanou platformu. Tepelná tisková hlava přejíždí po trajektorii průřezu objektu nad práškem a nanáší jen tolik tepla, které je potřebné k spékání vrchní vrstvy prášku. Jakmile je vrstva kompletní, celý proces se

opakuje, až se vytvoří požadovaný 3D objekt. Přebytečný prášek obklopující objekt pomáhá zajistit podporu pro složité tvary a převisy. Nepoužitý prášek je vhodný pro vícenásobné použití po recyklaci. [20]

2.5.3 DMLS – Přímé kovové laserové spékání

Je to aditivní výrobní technika, která se používá k výrobě průmyslových, lékařských a další dílů, které mají malé nebo střední velikosti, velmi složitých dílců. Díky schopnosti vytvářet více částí najednou je DMLS velmi nákladově a časově efektivní technologie. DMLS je také jedním z mála aditivních výrobních technologií, které jsou použity ve výrobě. Vzhledem k tomu, že díly jsou postaveny po vrstvách, je možné navrhnout vnitřní prvky a průchody, které by nemohly být odlité nebo jiným způsobem obrobené. [21]

Samotný proces výroby probíhá tak, že je ze zásobníku vytlačeno určité množství prášku, které je rozprostřeno po platformě pomocí ramena s keramickým břitem. Paprsek laseru přejíždí po trajektorii daného průřezu, kovový prášek je nataven a dochází ke spékání vrstvy. Tento proces se opakuje až do dokončení celého 3D modelu. Při stavbě dílu je důležitá fixace pomocí podpůrné struktury, která je stavěna zároveň s výrobkem, a po vytvoření modelu se musí odstranit. Pro většinu materiálů je pracovní komora vyplněna dusíkem, a to z důvodu ochrany vyráběných dílů před oxidací. Pro titan se používá argon. [22]

2.5.4 SLM – Selektivní laserové tavení

Selektivní tavení laserem je aditivní výrobní technologie, která může tisknout kovové části ve 3D. Nejčastěji je tato technologie používaná v leteckém průmyslu a v oblasti medicíny. Výroba kovových dílů 3D tiskem může být rovněž provedeno technologií DMLS. Hlavním rozdílem mezi těmito dvěma technologiemi je míra, do jaké se částice roztaví. U metody DMLS se částice zcela neroztaví. Materiály, které se u metody SLM používají, jsou například ocel, titan, hliník, kobalt, chróm nebo slitiny niklu. [23]

Proces výroby probíhá tak, že kovový prášek je rovnoměrně rozprostřen na stavební platformě, která se pohybuje ve svislé ose (Z). Poté, co je vrstva prášku nanesena, je průřez součásti fúzován selektivním roztavením prášku pomocí laserového paprsku, obvykle ytterbia vláken laseru se stovkami wattů. Laserový paprsek je směřován ve směru X a Y s dvěma vysokofrekvenčními snímacími zrcadly. Laserová energie je dostatečně silná, aby umožnila úplné roztavení kovových částic, a dojde k vytvoření pevného kovu. Tento proces se opakuje pro každou vrstvu součásti, dokud není hotový požadovaný 3D model. To se děje uvnitř

komory obsahující kontrolovanou atmosféru inertního plynu, a to buď argonu, nebo dusíku. [24]

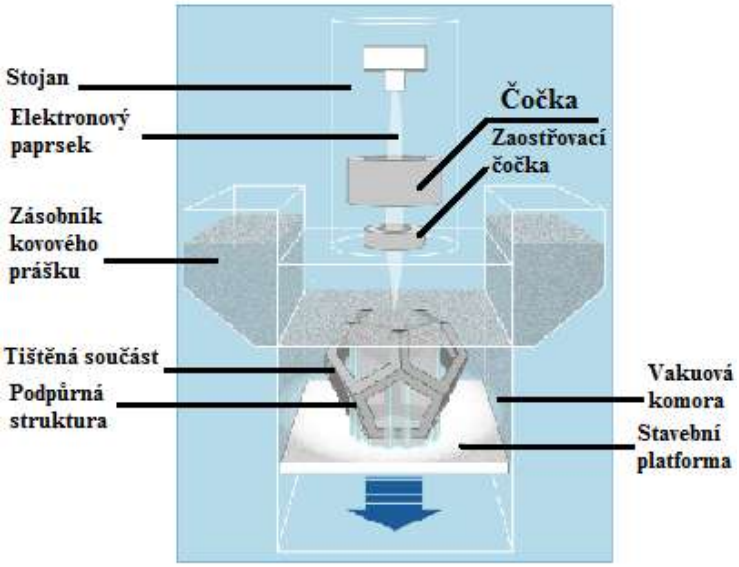
2.5.5 Laser Cusing – Laserové tavení kovů

Tato technologie se používá pro výrobu šperků, v zubním, automobilovém nebo leteckém průmyslu. Mohou se vyrábět jak prototypy, tak i funkční části. Laser Cusing má stejný postup výroby jako technologie SLM. [42]-[43]

2.5.6 EBM – Tavení elektronovým paprskem

Technologie vyrábí díly ze standardních kovů s vysokou hustotou a dobrými mechanickými vlastnostmi (srovnatelné s tradičními výrobními technologiemi). Tavení elektronovým paprskem je stále pomalý a nákladný proces, který pracuje pouze s omezeným souborem kovů. Části obvykle vyžadují poměrně náročnou povrchovou úpravu. Ve srovnání s laserovým tavením, technologie nedosahuje stejně dobré kvality povrchu.

Tavení elektronovým paprskem má podobný proces jako SLM, ale pracuje s elektronovým paprskem místo laseru. Stroj rozprostře vrstvu kovového prášku na stavební platformu, vrstva se nataví elektronovým paprskem a stavební platforma se posune o tloušťku další vrstvy. Takto se proces opakuje až do vytvoření 3D modelu. EBM vyžaduje podpůrné struktury, což kotví díly a převislé struktury k stavební platformě. To umožňuje přenos tepla od místa, kde se taví prášek. Celý proces (viz obrázek 6) probíhá ve vakuu, aby se minimalizoval vliv oxidace. [25]

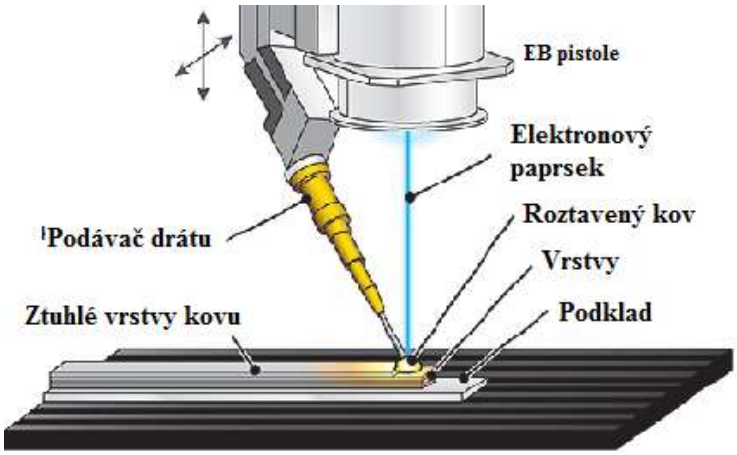


Obrázek 6: Technologie EBM [25]

2.5.7 EBAM – Aditivní výroba elektronovým paprskem

EBAM je technologie 3D tisku pro kovové díly. Je to podobná technologie jako EBM a SLM, ale na rozdíl od těchto technologií dosahuje úplného roztavení kovového prášku. EBAM může produkovat vysoce kvalitní, velké kovové konstrukce, vyrobené z titanu, tantalu a slitiny niklu, s velmi malým odpadovým materiálem. Kromě toho tento proces může být použit v jakékoliv fázi životního cyklu produktu: od rychlých prototypů a výrobních dílů až po opravu a repasování dílů.

EB pistole vyzařuje elektronový paprsek, který roztaví přiváděný kovový drát. Takto vznikají postupné vrstvy, dokud součást nedosáhne požadovaného tvaru a je připravena pro konečné opracování. Proces EBAM má také možnost duálního podávání drátu, a díky tomu se mohou kombinovat dvě různé kovové slitiny. Princip technologie je znázorněný na obrázku 7. [26]



Obrázek 7: Technologie EBAM [27]

2.5.8 DSM – Tisk pískových forem

DSM je 3D technologie na principu spékání písku pomocí laseru, která vyrábí pískové formy pro odlévání železných a neželezných kovů. Systém je velmi vhodný pro složité odlitky, pro které by byla výroba konvenčním způsobem cenově i časově náročná. [27]

2.5.9 LMF – Tisk kovového prášku

Tato technologie vyrábí součásti, které splňují nejvyšší požadavky pro namáhané součásti. Součásti mají nízkou hmotnost, a proto je tato technologie obzvláště vhodná pro letecký, automobilový průmysl nebo také v lékařství.

Prášek se aplikuje na základní platformu. Laserový paprsek taví prášek podle CAD modelu a spojuje materiál v definovaných místech s vrstvou ležící pod nim. Tento postup se opakuje, dokud kovová součást není kompletní. [28]

2.5.10 FCP – Tisk keramických modelů

FCP je proprietární 3D stereolitografická technologie. Tento proces, vyvinutý firmou 3DCeram, se nejčastěji používá v lékařském průmyslu pro vytvoření například keramických tibiálních osteotomických klínů, meziobratlových klecí nebo lebečních implantátů. Proces FCP se ale používá i v průmyslových odvětvích. [29]

Pomocí laseru se vytváří postupné vrstvy, dokud není hotový požadovaný tvar. Proces zahrnuje stavební složku v po sobě následujících vrstvách polymerizované pasty složené z fotosenzitivních pryskyřic a keramických prášků, jako je hydroxyapatit, oxid zirkoničitý nebo oxid hlinitý. Poté se součást vytvrzuje pro získání požadované hustoty a tvrdosti v UV komoře. [30]

2.6 Směřované nanášení materiálu - Directed Energy Deposition

Tento proces se běžně používá k opravě komponentů. Stroj se skládá z trysky namontované na víceosé rameno, která vkládá roztavený materiál na dané místo, kde ztuhne. Postup je podobný jako u technologie vytlačování materiálu, ale tryska se může pohybovat v různých směrech. Materiál se taví při nanášení laserovým nebo elektronovým paprskem. Pro tisk se používají materiály jako polymer nebo keramika; obvykle ve formě prášku nebo drátu. [53]

2.6.1 LENS – Laserové inženýrství síťového tvarování

Technologie LENS využívá vysoce výkonný laser. Mohou se zpracovávat široké škály kovů, včetně titanu, niklu a jeho superslitin, nerezových ocelí a nástrojových ocelí. LENS má konzistentně lepší metalurgické a mechanické vlastnosti než jiné procesy, díky zdokonalené mikrostruktuře. Tato technologie je ideální pro výrobu komponentů v letectví, obraně, výrobním a zdravotním průmyslu.

Proces se provádí v hermeticky uzavřené komoře, která je naplněna argonem, aby hladina kyslíku a vlhkost zůstala nižší než 10 ppm. To udržuje součást čistou a brání v oxidaci. Kovový prášek se dodává do depoziční hlavy vlastním práškovým napájecím systémem, který je schopen přesně regulovat hmotnostní průtok. Až je jedna vrstva hotová, depoziční hlava se

posune a vytváří další vrstvu. Vybudováním následných vrstev je celá součást vytvořena. Po dokončení se součást odstraní z platformy a může být tepelně zpracována. [31]

2.6.2 DMD – Přímé kovové nanášení

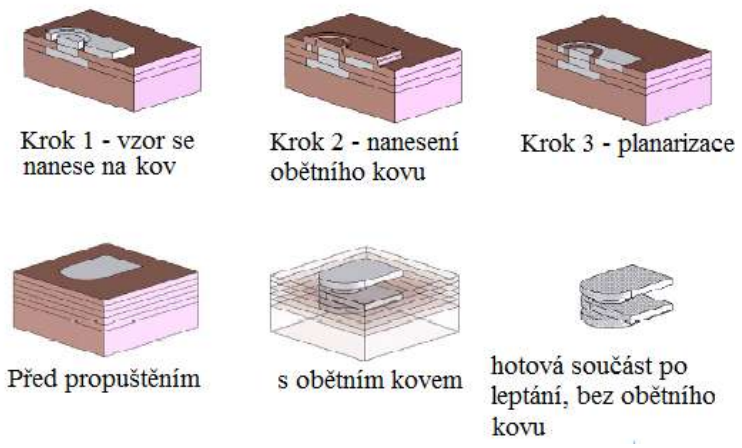
DMD je moderní aditivní výrobní technologie, která se používá k opravě a obnově opotřebovaných nebo poškozených komponentů nebo k výrobě nových komponentů a nanášení korozivzdorného nátěru. DMD vytváří plné, funkční kovové díly, přímo z CAD dat, nanesením kovového prášku bod po bodu, pomocí laserového tavení a patentovaného řídicího systému pro udržení rozměrové přesnosti a integrity materiálu. Díky systému zpětné vazby může DMD vytvořit nebo opravit součásti velmi složitých tvarů.

Laserový paprsek je zaměřen na pracovní desku, vytvoří lázeň, do které se vstřikuje malé množství kovového prášku, a tím se vytvoří tenká vrstva. Paprsek se přesune na další místo na základě CAD geometrie a vytváří tak postupné vrstvy. DMD systémy jsou vybaveny tříosými nebo pětiokými hlavami s další osou otáčení na pracovním stole, který umožňuje nanášení téměř jakékoli geometrie. [32]

2.6.3 EFAB – Ultra-přesná netradiční kovová výrobní technologie

EFAB technologie může vytvářet složité, miniaturní trojrozměrné kovové struktury, které by jiné technologie nedokázaly vytvořit. Tento proces je vhodný pro širokou škálu aplikací. Nejčastěji je ale využívána pro medicínskou aplikaci, ve které je požadována miniaturizace, jako jsou například přesné mikrochirurgické nástroje. [33]

EFAB je aditivní proces a probíhá v čisté místnosti. Materiál se skládá nejméně ze dvou kovů, a to ze strukturálního a obětního. Vzor požadované vrstvy se nanese na konstrukční materiál pomocí tzv. masky, poté se nanese vrstva obětního kovu a dochází k planarizaci, což je proces vyhlazování povrchu s kombinací chemických a mechanických sil. Proces technologie EFAB je znázorněný na obrázku 8. [34]

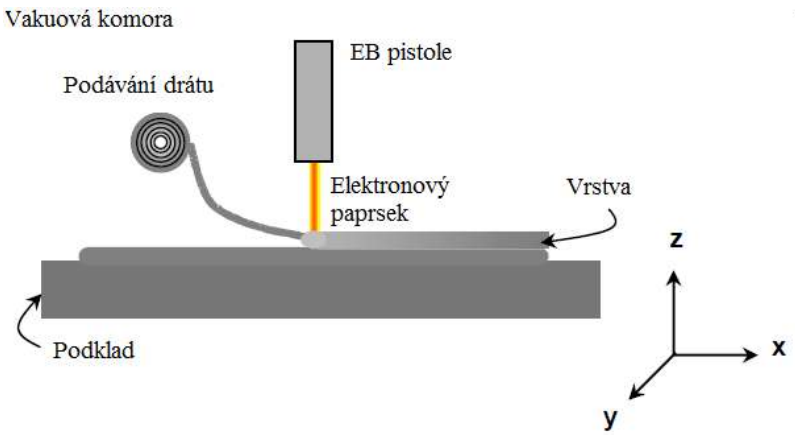


Obrázek 8: Technologie EFAB [34]

2.6.4 EBF – Volné zpracování elektronovým paprskem

EBF je aditivní výrobní proces, který používá zaostření elektronového paprsku ve vakuovém prostředí pro vytvoření kovové lázně. Tento proces vyvíjí NASA k vytvoření kovových dílů a nástrojů, který ušetří čas a náklady tím, že umožňuje vytvořit tyto díly až ve vesmíru. [35]

EBF pracuje ve vakuové komoře, kde je elektronový paprsek zaměřen na neustále podávající zdroj kovu, který se roztaví a vzniká vrstva. Tento proces (viz obrázek 9) se opakuje, dokud není součást kompletní. Tento proces je vhodný jak pro malé součásti, tak pro velké až několik metrů, omezen je hlavně velikostí vakuové komory a množství přiváděného drátu. Materiál, který se používá, musí být kompatibilní s elektronovým paprskem tak, aby mohl být zahříván proudem energie a byl nataven, takže ideální je hliník spolu s dalšími kovy. EBF zvládne dva různé zdroje kovu, které v lázni smícháme do unikátní slitiny nebo může být jeden materiál uložen uvnitř druhého. [36]



Obrázek 9: Technologie EBF [36]

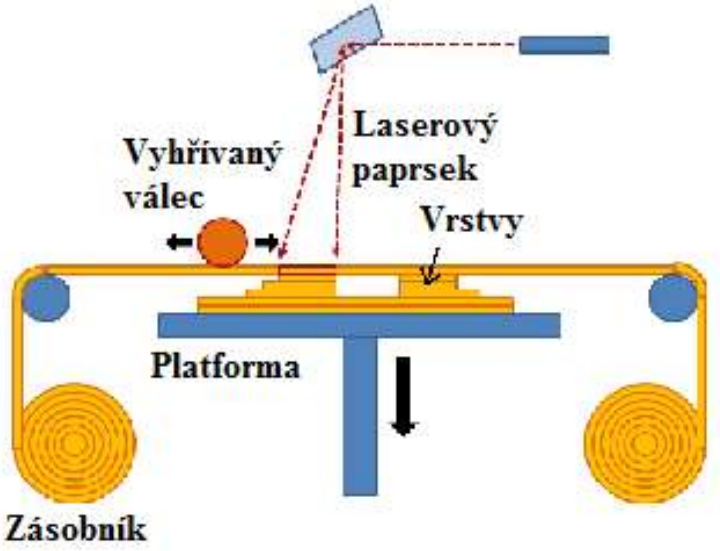
2.7 Plošné laminování – Sheet Lamination

Stavba objektů je založena buď na principu vyřezání obrysu dané vrstvy a následného nanesení, nebo nanesení všech vrstev a následného vyřezání obrysu objektu. Tyto procesy mohou být dále rozděleny podle mechanismů použitého ke spojení jednotlivých vrstev, a to lepení, tepelné procesy spojování, upnutí nebo ultrazvukové svařování. [54]

2.7.1 LOM – Výroba vrstvené součásti

LOM je aditivní výroba vyvinutá společností Helisys Inc. Tato technologie vytváří velmi přesné modely s kvalitním povrchem a nízkými náklady. Přesto tato technologie není příliš populární a využívá se převážně v architektuře a geografii.

Stejně jako všechny 3D technologie, musí mít modely svůj CAD soubor a převést tento model do formátu STL. LOM technologie používá spojitou vrstvu materiálu (nejčastěji plast nebo papír, méně často pak kov). Vyhřívaný válec přilepí první list materiálu k platformě pomocí lepidla a stlačení. Počítačem řízený laser nebo čepel nože poté řeže materiál do požadovaného tvaru. Laser také krájí přebytečný materiál křížovým vzorem, což usnadňuje jeho odstranění po dokončení tisku. Poté, co je vytvořena jedna vrstva, výrobní platforma se sníží o tloušťku jedné vrstvy a vyhřívaný válec nanese opět další vrstvu materiálu. Tento postup se opakuje, dokud se nevytvoří celý objekt. Jakmile je objekt hotový, je odstraněn z platformy a přebytečný materiál je odříznut. Objekty tištěné z papíru mají podobné vlastnosti jako dřevo a mohou být broušené. Obvykle jsou přetřeny ještě barvou nebo lakem jako ochrana před vlhkostí. Princip technologie LOM je znázorněný na obrázku 10. [37]

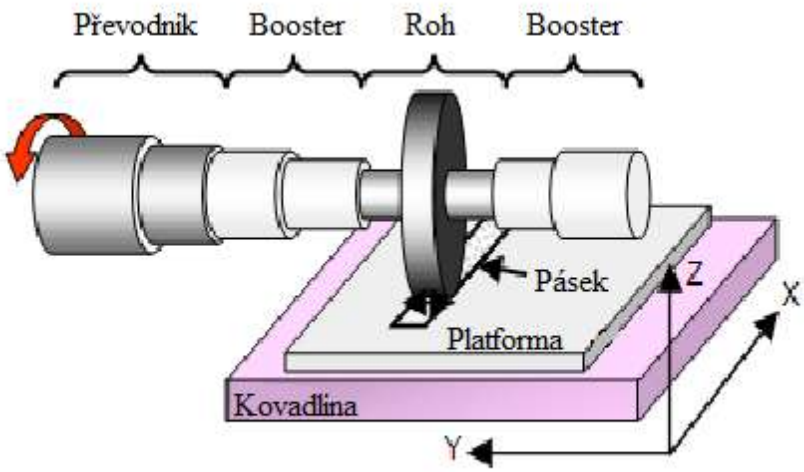


Obrázek 10: Technologie LOM [38]

2.7.2 UAM – Ultrazvuková aditivní výroba

Je to revoluční technologie, která využívá sílu zvuku ke sloučení vrstev kovové fólie. Tento proces vytváří skutečné metalurgické vazby s plnou hustotou a pracuje s různými kovy, jako je hliník, měď, nerezová ocel a titan. Při kombinaci aditivní a subtraktivní procesní schopnosti, UAM může vytvořit hluboké drážky, mříž nebo voštinové vnitřní struktury. [39]

Proces probíhá pomocí vysokofrekvenčních vibrací. Co odlišuje proces od tradičních ultrazvukových svařovacích metod je to, že svařovací roh se otáčí. Tento proces používá ultrazvukový měnič k vibraci svařovacího rohu. Roh působí také jako zhutňovací válec, přičemž se vytvoří kolmá síla na pásek. Povrch rohu je strukturovaný, aby umožňoval přenos vibrační energie do materiálu. Kovová fólie je protahována ze sonotrody, která používá tlak prostřednictvím normálové síly a ultrazvukových oscilací, a tím se fólie přilepí se na platformu. Tento proces se opakuje, dokud není požadovaná oblast pokryta ultrazvukově zpevněným materiálem. CNC mlýn je pak použit pro odebrání přebytečné fólie ze zařízení a k dosažení požadované geometrie. Vklad fólie a odebrání přebytečného materiálu se opakuje, dokud není dosažena požadovaná výška (obvykle 3–6 mm). V této výšce je menší dokončovací mlýn použit k vytvoření požadované tolerance a k povrchové úpravě dílu. Vklad fólie, odebrání přebytečného materiálu a povrchový úprava dokončovacím mlýnem se opakuje, dokud není vyroben hotový objekt, který je poté odebrán z platformy. Princip technologie UAM je znázorněný na obrázku 11. [40]-[41]



Obrázek 11: Technologie UAM [40]

2.8 Firmy zabývající se danými technologiemi

Aditivní výroby se klasifikují do 7 kategorií podle standardní terminologie:

- Nastřikování pojiva – Binder Jetting
- Nastřikování materiálu – Material Jetting
- Vytlačování materiálu – Material Extrusion
- Fotopolymerizace – Vat Photopolymerization
- Tisk kovových prášků – Powder Bed Fusion
- Směřované nanášení materiálu – Directed Energy Deposition
- Plošné laminování – Sheet Lamination

Aby se dosáhlo pokroku aditivní výroby, zejména v průmyslu, musí tyto technologie splňovat požadavky a očekávání, které jsou na ně kladeny. Patří mezi ně výběr materiálů, vývoj potřebného strojního zařízení nebo rozvoj nových i stávajících aditivních výrobních technologií. Tomu přispívají nejrůznější instituce, které investují svůj kapitál do tohoto odvětví a pomáhají tak rozvíjet průmysl ve světě. Tyto instituce jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3: Firmy zabývající se danými technologiemi [58]

Technologie aditivní výroby						
Nastřikování pojiva	**Nastřikování materiálu**	**Vytlačování materiálu**	**Fotopolymerizace v nádobě**	**Tisk v práškovém loži**	**Směřované nanášení mat.**	**Plošné laminování**
Indirect 3DP	**Direct 3DP**	**FDM - FFF**	**SLA**	**SLS-P**	**LENS**	**LOM**
ExOne	Cosine	Stratasys	3DSystems	3DSystems	Optomec	Cubic Technologies
3DSystems (Zcorp) Project	Voxeljet	MakerBot	FormLabs	EOS	**DMD**	Mcor
MC Machinery	xlaForm	RepRap	Binhurp	Binhurp	Grupo POM	**UAM**
DoD	Keyence	Fochif	Farsoon	Farsoon	**EFAB**	Fabrisonic
Solidscape Inc	Luxexcel	Xery	Shaaxi Hengtong	Aspect	MicroFabrica	
MicroFab	ExOne	Ultimaker	xjrp	Wuhan Huake 3D	**EBF3**	
	Polyjet	**PJP**	Cmet	AFS	NASA Langley	
	Stratasys	3DSystems	Roland	Beijing Longyuan		
	MJP - CJP	**BioPlotting**	Unirapid	**SHS**		
	3DSystems	Advanced Solutions	**M-SLA**	Blueprinter		
	Hewlett Packard	BioBots	microTEC	**SLS-M**		
	DMP	Cellink	D-Mec	EOS		
	Fujifilm	Cyfuse	3DSystems	MC Machinery		
	3DSystems	Organovo	**DWS**	Farsoon		
	Inkjet - MM	RegenHu	DWS Systems	**DMSL**		
	Solidscape Inc	TeVidoBio Devices	**DLP**	EOS		
	RPBO - DIW	Amtech	EnvisionTec	Renishaw		
	Vito	EnvisionTec	Carima	**SLM**		
	HVIP	nScrypt	Kevvox	EOS		
	TNO	**DRCP**	Asiga	Renishaw		
	MPP	MicroFab	**Moving DLP**	SLM Solutions GmbH		
	Sinteff	**Direct white**	Prodways	Realizer		
		Optomec	**MLB**	Phoenix (3DSystems)		
		nScrypt	Hunstman Advanced Materials	Binhurp		
		WDM	**FTI**	**Laser Cusing**		
		Stratasys	3DSystems	Concept Laser		
		3DFD	**LCM**	**EBM**		
		Vito	Lithoz	Arcam		
		MEM		3DSystems		
		Tiertime		**EBAM**		
		LDM		Sciaky		
				DSM		
				3Geometry		
				LMF		
				Trumpf		
				Sisma Group		
				FCP		
				3DCeram		

3 Dokončovací úpravy plastů

Dokončovací úpravy zahrnují operace, které upravují konečný vzhled povrchu součásti. Finální výrobek, který získáme po výrobě, nemá zpravidla dobrou kvalitu povrchu a je proto potřeba ho upravit. Výrobek musíme nejdříve zbavit podpůrných konstrukcí a přebytečného materiálu. To se provádí hrubým mechanickým očištěním, zpravidla ručním odloupnutím podpěr. Další možné kroky jsou máčení v louhu pro usnadnění oddělení podpůrných konstrukcí, otryskání tlakovou vodou nebo použití čistidel. Poté následují nejrůznější dokončovací úpravy, které jsou podobně jako operace čistění zpravidla prováděny ručně. [44]

3.1 Broušení

Nejčastější dokončovací úprava je broušení. Zpravidla se provádí ručně brusným papírem nebo případně ruční bruskou s brusným kotoučem. Konečná kvalita povrchu je závislá na počáteční drsnosti povrchu, druhu a tvrdosti broušeného materiálu, časem broušení a zrnitostí abraziva. [45]

3.2 Tryskání

Méně používaná, ale zároveň nejvhodnější úprava je tryskání vody s abrazivem. Mohou se použít broky nebo písek. Velkou výhodou této metody je možnost použití i pro broušení vnitřních, špatně dostupných otvorů. Výsledkem tryskání je hladký a matný povrch. [45]

3.3 Vyhlazování nad párou acetonu

Vyhlazování nad párou acetonu se provádí v komoře, kde je aceton zahřátý na danou teplotu a začíná se odpařovat. Výrobek začne měknout a pomocí gravitace plast začne pomalu stékat a vzniká tak lesklý povrch. Po vyjmutí je součást měkká a tvárná. Po dvou dnech má součást opět svou tvrdost. Výhoda rozpustnosti ABS v acetonu je také využívána ke slepení poškozených součástí. V acetonu se roztaví ABS plast a tento roztok je poté nanášen na poškozená místa a části jsou přilepeny k sobě. Poté se aceton odpaří a lepené části jsou pevně spojeny. Další možností je použití roztoku dichlormethanu, trichloretylenu a methylmethakrylátu. Součásti jsou v roztocích máčeny. [46]

4 Výběr modelů řezných nástrojů pro 3D tisk

Na žádost firmy Walter se tiskly dva speciální nástroje. Těla nástrojů byly vyrobeny podle požadavků zákazníka a byly použity řezné destičky firmy Walter. Tiskla se frézovací hlava k výrobě forem a sdružený nástroj k vrtání, zahlubování děr a zkosení hrany, které jsou popsaný níže.

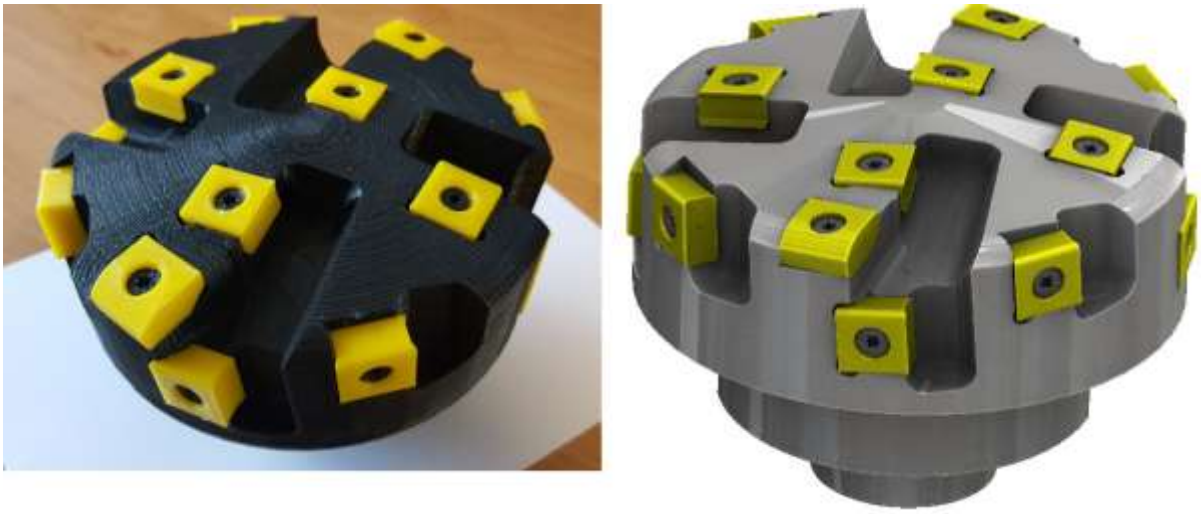
4.1 Firma Walter

Firma byla založena v roce 1919 Richardem Waltrem v Düsseldorfu a měla název Walter Hartmetall GmbH. Od roku 1995 počet poboček v zahraničí dramaticky vzrostl. V zemích jako jsou například Česká republika, Polsko, Brazílie, Španělsko, Čína a Singapur. V roce 2007 a 2008 byly založeny pobočky v Argentině, Malajsii, Rusku, Švédsku a v Japonsku. Dnes má Walter AG více než 30 poboček po celém světě. V roce 2007 se Walter AG sloučili se dvěma firmami v odvětví nástrojů – Titex ve Frankfurtu, Prototyp v Zell am Harmersbach a v roce 2010 s americkou firmou Valenite. Společnost Walter v současnosti spojuje pět kvalifikovaných značek: Walter, Walter Titex, Walter Prototyp, Walter Valenite a Walter Multiply. Díky výrobnímu sortimentu více než 49 000 katalogových nástrojů k frézování, vrtání, soustružení a výrobě závitů je společnost Walter komplexním dodavatelem v oblasti obrábění kovů. Hlavní sídlo společnosti Walter AG je v Tübingenu na jihu Německa. [59]

4.2 Frézovací hlava

Frézovací hlavy se používají pro obrábění rovinných nebo tvarově složitých ploch (např. výroba forem na odlitky). Je to v podstatě čelní fréza se vsazenými vyměnitelnými břitovými destičkami z rychlořezné oceli nebo ze slinutých karbidů.

V bakalářské práci je popsána frézovací hlava F2007-6671490, firmy Walter Tools. Použité břitové destičky P3400-6025709 a LNMU150812 (viz obrázek 13) jsou ze slinutých karbidů, upnuty pomocí šroubků FS1009. Vytištěný řezný nástroj je porovnán s modelem v softwaru SolidWorks na obrázku 12.



Obrázek 12: Frézovací hlava F2007-6671490

Vestavěné díly

D_c mm	100-315
Upínací šroub pro VBD	FS1009 (Torx 20)
Utahovací moment	5,0 Nm

Kosočtvercové tangenciální

Vyměnitelné břitové destičky

Označení	Toleranční třída	Počet řezných hran	l_2 mm	l mm	s mm	r mm	P HC WKP25	P HC WKP35	P HC WKP35S	P HC WSP45	M HC WSM35	M HC WSP45	K HC WAK15	K HC WKK25	K HC WKP25	K HC WKP35	K HC WKP35S	N HC WXN15	N HW WK10	S HC WSM35	S HC WSP45	H HC WHH15
LNMU150812-F57T	M	4	14	15	8	1,2	●	●	●				●		●	●	●					

Obrázek 13: Parametry břitové destičky LNMU150812+FS1009 [63]

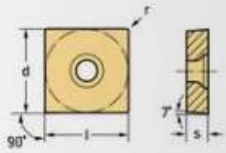
4.3 Sdružený vrták

Sdružené vrtáky jsou uzpůsobeny pro vrtání, zahlubování děr, předvrtání díky pro závit, řezání závitu apod. Používají se v sériové a hromadné výrobě k dosažení časové úspory.

V bakalářské práci je popsán sdružený vrták B4073-6695147, firmy Walter Tools. Tento vrták slouží k vrtání, zahlubování děr a sražení hrany. Použité břitové destičky SCGT09T304-PF2 (viz obrázek 15), CCGT09T304-PF2 (viz obrázek 16) a P6004-D14,00R (viz obrázek 17) jsou ze slinutých karbidů, upnuty pomocí šroubků. Vytištěný řezný nástroj je porovnán s modelem v softwaru SolidWorks na obrázku 14.

Obrázek 14: Sdružený vrták B4073-6695147

Pozitivní základní tvar
SCGT

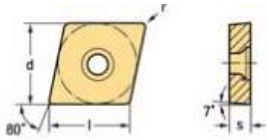


Vyměnitelné břitové destičky

Označení	d mm	l mm	s mm	r mm	f mm	ap mm	P HC WPP01	P HC WPP10	P HC WPP20	P HC WPP30	M HC WSM10	M HC WSM20	M HC WSM30	K HC WAK10	K HC WAK20	K HC WAK30	N HC WXN10	N HW WK1	S HC WSM10	S HC WSM20	S HC WSM30
SCGT09T304-PF2	9,525	9,525	3,97	0,4	0,08 - 0,25	0,2 - 2,5						●					●	●		●	

Obrázek 15: Parametry břitové destičky SCGT09T304-PF2 WK1 [63]

Pozitivní základní tvar CCGT

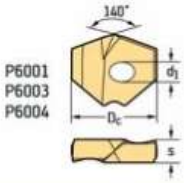


Vyměnitelné břitové destičky

Označení	d mm	l mm	s mm	r mm	f mm	ap mm	P HC WPP01	P HC WPP10	P HC WPP20	P HC WPP30	M HC WSM10	M HC WSM20	M HC WSM30	K HC WAK10	K HC WAK20	K HC WAK30	N HC WXN10	N HW WK1	S HC WSM10	S HC WSM20	S HC WSM30	H BL WCB30	H BH WCB50
CCGT09T304-PF2	9,525	9,67	3,97	0,4	0,08 - 0,25	0,2 - 2,5					☻	☻					☻	☻	☻	☻			

Obrázek 16: Parametry břitové destičky CCGT09T304-PF2 WK1 [63]

Špičky vrtáků



Špičky vrtáků

P6004

Označení	Řezné hrany	D_c mm	d_1 mm	s mm	P6001 P HC WXP 45	P6003 P HC WMP 35	P6003 M HC WMP 35	P6002 K HC WXK 25	P6004 N HC WNN 25	P6003 S HC WMP 35
P60 . . –D14,00R	2	14,00	3	4,0	☻	☻	☻	☻	☻	☻

Obrázek 17: Parametry břitové destičky P6004-D14,00R WNN25 [63]

5 Výroba modelů řezných nástrojů na 3D tiskárně

Modely řezných nástrojů byly vyráběny pro výukové účely, díky kterým mohou studenti získat informace o speciálních řezných nástrojích, s kterými by se na školách nesetkali kvůli vysokým pořizovacím cenám. V této kapitole jsou popsány použité 3D tiskárny, použitý materiál a postup výroby. Výstupem jsou reálné modely z PLA materiálu.

5.1 Použité 3D tiskárny – MakerBot Replicator Z18

MakerBot Replicator Z18 (viz obrázek 18) vyrábí pevné, trojrozměrné předměty z roztaveného PLA vlákna. Má připojení přes Wi-Fi, USB nebo Ethernet. Vytváří modely vysokého rozlišení, s hladkým povrchem, který se nepotřebuje dále brousit. Slouží k vytvoření realistických prototypů pro prezentace a předvádění. Vlastnosti a parametry této tiskárny jsou uvedeny v tabulce 4. [61]

Tabulka 4: Vlastnosti a parametry tiskárny MakerBot [60]

Technologie tisku	modelování tavným uložením FDM
Tiskový prostor	30 × 30,5 × 45,7 cm (41 815 cm^3)
Přesnost vrstvy	100 µm
Průměr vlákna	1,75 mm
Průměr trysky	0,4 mm
Tiskový materiál	PLA
Rozměry tiskárny	65 × 71,9 × 106 cm
Hmotnost tiskárny	41 kg
Podporované typy souborů	STL, OBJ, Thing, MakerBot
Konstrukce tiskárny	lakovaná ocel s PC-ABS a hliníku
Platforma	PC-ABS
XY přesnost polohování	11 µm
Z přesnost polohování	2,5 µm
Napájení tiskárny	100–240 V, 5,4–2,2 A, 50/60 Hz, 350 W

Obrázek 18: Tiskárna MakerBor Replicator Z18 [65]

5.2 Použité 3D tiskárny – Felix 2.0

Felix 2.0 (viz obrázek 19) je 3D tiskárna od kvalitního nizozemského výrobce 3D tiskáren FelixRobotics. Nabízí velmi kvalitní tisk, tichý provoz a velkou tiskovou plochu. Díky vyhřívané podložce zaručuje rovnoměrné chladnutí modelu a model se tak při chladnutí nedeformuje. Tato verze 3D tiskárny je dodávána jako stavebnice. Vlastnosti a parametry této tiskárny jsou uvedeny v tabulce 5. [62]

Tabulka 5: Vlastnosti a parametry tiskárny Felix [62]

Technologie tisku	modelování tavným uložením FDM
Tiskový prostor	25,5 × 20,5 × 23,5 cm
Přesnost vrstvy	0,05 mm
Průměr vlákna	1,75 mm
Průměr trysky	0,35 mm
Tiskový materiál	PLA, ABS
Rozměry tiskárny	45 × 50 × 53 cm
Hmotnost tiskárny	6,7 kg
Konstrukce tiskárny	hliníkový rám
Napájení tiskárny	12V 250W
Rychlost tisku	max. 200 mm/s

Obrázek 19: Tiskárna Felix 2.0 [66]

5.3 Použitý materiál

K tisknutí modelů byl použit materiál MakerBot PLA (viz obrázek 20). Tělo nástroje a šroubky byly tištěny černým PLA vláknem a vyměnitelné břitové destičky žlutým PLA vláknem, pro realističtější vzhled nástrojů. Cena jedné cívky o hmotnosti 0,9 kg se pohybuje okolo 1100, – Kč. Technické vlastnosti tohoto materiálu jsou uvedeny v tabulce 6.

Obrázek 20: Použitý materiál MakerBot PLA [64]

Tabulka 6: Technické vlastnosti materiálu MakerBot PLA [64]

TEPLOTY	
Teplota skelného přechodu	60 – 65 °C (140 – 149 °F)
Teplota tavení	150 – 160 °C (302 – 320 °F)
Teplota trysky	215 °C (419 °F)
ROZMĚRY A HMOTNOST	
Průměr cívky	25,0 cm
Šířka cívky	4 cm
Průměr otvoru na náboj	5,08 cm
Průměr vlákna	1,75 mm
Přepravní váha	1,36 kg
Čistá hmotnost	0,9 kg

5.4 Postup tisku

1. CAD modely a převod souboru na STL

CAD modely a výkresy nástrojů poskytla firma Walter. Modely byly dodány v souboru PRT. V programu SolidWorks 2015 se modely upravily tak, že těla držáku se rozdělila na dvě části pro jednodušší a přesnější tisk a převedly se do standardního datového souboru pro aditivní výrobu – STL.

Jak převést soubor PRT na STL

1. Otevřete soubor **PRT** v systému SolidWorks.

2. Zvolte **Uložit jako** z menu **Soubor**.

3. Vyberte **STL** z menu **Formát** a klepněte na tlačítko **Uložit**.

2. Nastavení tiskárny

K tomuto kroku slouží softwary určené pro dané tiskárny. V této bakalářské práci byl použit software MakerBot Desktop a FelixPrinters. Je velmi důležité nastavit správné parametry tisku a umístění modelů na platformě.

3. 3D tisk – MakerBot Replicator Z18

Pomocí softwaru MakerBot Desktop se vytvoří požadovaný G-kód, který se, díky možnosti připojení k tiskárně pomocí USB, přenese do zařízení. Tiskárna MakerBot

Replicator Z18 má velmi jednoduché ovládání na digitálním barevném LCD panelu, který se ovládá pomocí otočného tlačítka.

Velkou problematikou, která se objevuje v mnoha případech 3D tisku, je odlepování objektů od platformy. Tento problém nastal i u této tiskárny a bohužel, s mými zkušenostmi a znalostmi, se nepodařilo tento problém odstranit.

4. 3D tisk – Felix 2.0

Felix 2.0 poskytla Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie. Velkou výhodou této tiskárny je nízká pořizovací cena a vysoká přesnost tištěných objektů. Tiskárna využívá software FelixPrinters.

Frézovací hlava:

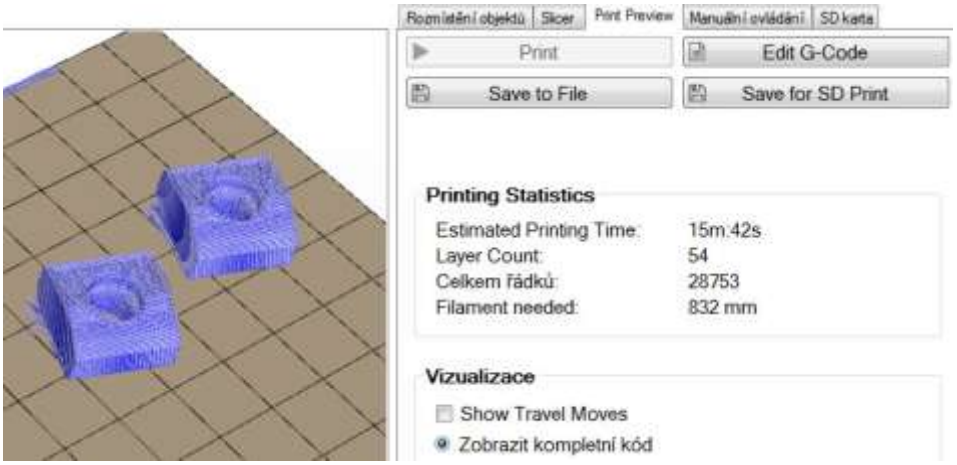
- tělo držáku bylo tištěno na dvě části (viz obrázky 23 a 24), aby se předešlo potřebě podpor, a tím byl povrch modelu řezného nástroje přesnější a kvalitnější;
- břitové destičky stejného druhu byly tištěny najednou (viz obrázky 21 a 22), aby se zkrátila doba tisku;
- šroubky byly tištěny na podstavci (viz obrázek 25), aby se zvětšila tištěná plocha, a tím se zabránilo odlepování objektů od platformy.

Celkový čas výroby řezného nástroje a parametry tisku jednotlivých částí jsou uvedeny v tabulce 7.

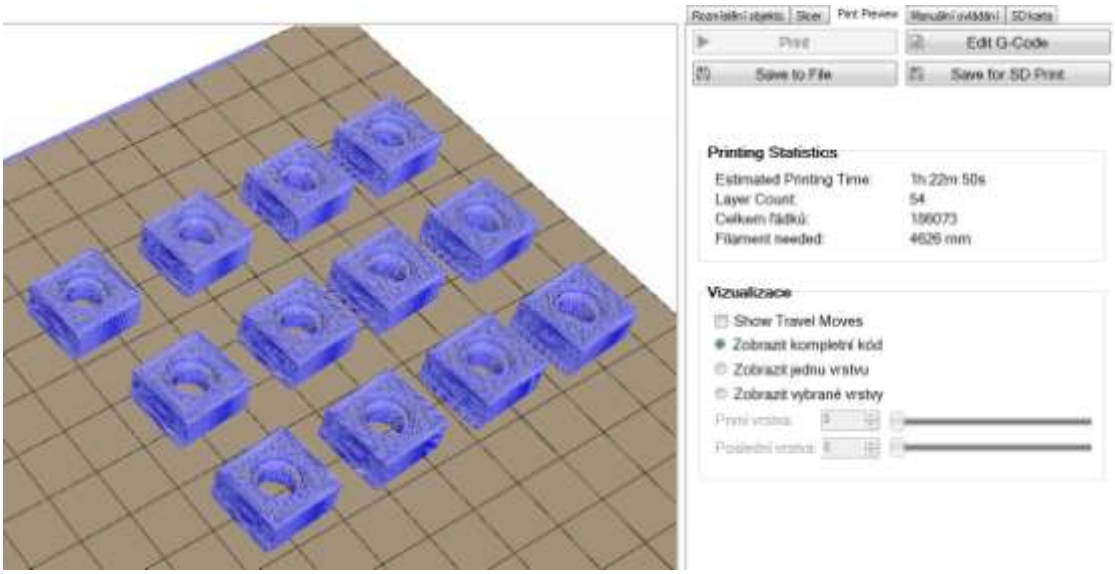
Tabulka 7: Parametry tisku frézovací hlavy

	Doba tisku	**Počet vrstev**	**Spotřeba mat.**	**Počet objektů**
Destičky P3400-6025709	0:15:42	54	832 mm	2
Destičky LNMU150812	1:22:50	54	4 626 mm	12
Držák – část 1	12:00:36	295	50 150 mm	1
Držák – část 2	5:47:47	284	23 060 mm	1
Šroubky FS1009	0:36:21	93	1 443 mm	14

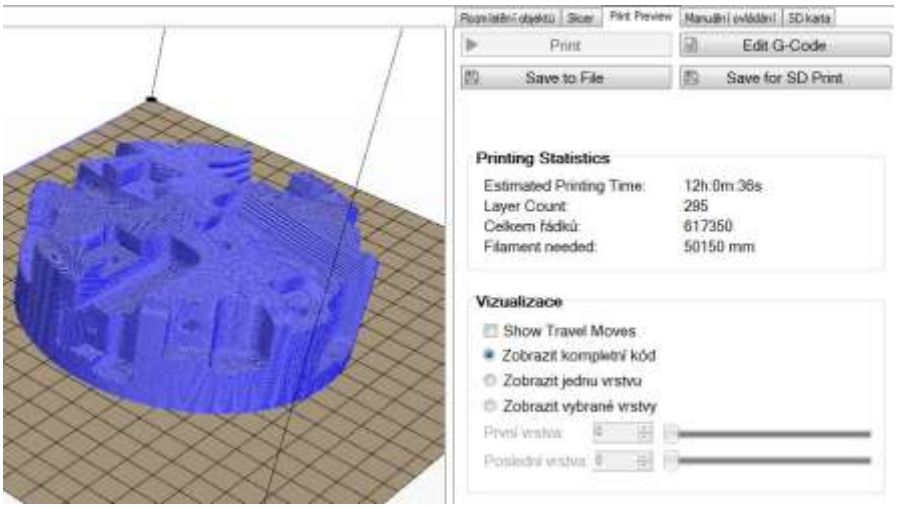
Příprava	0:50:00
Celkový čas výroby	20:53:16



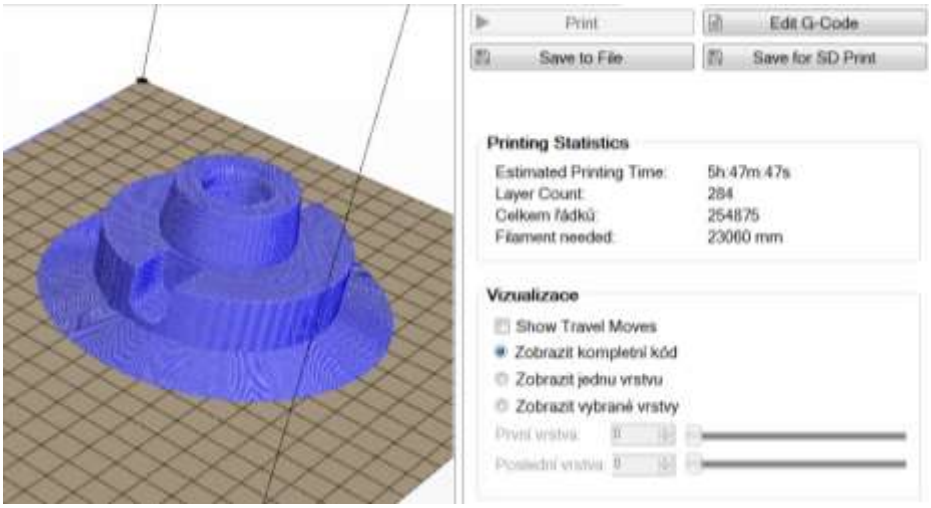
Obrázek 21: Modely destiček P3400-6025709



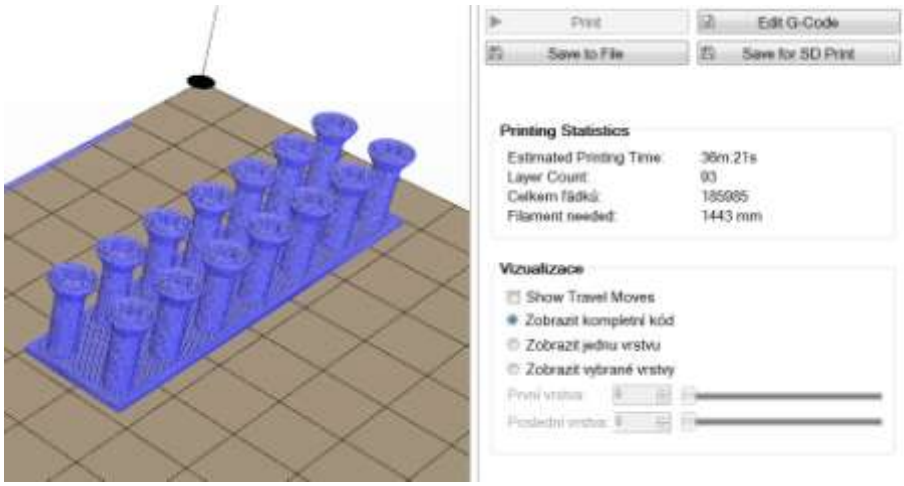
Obrázek 22: Modely destiček LNMU150812



Obrázek 23: Model držáku – část 1



Obrázek 24: Model držáku – část 2



Obrázek 25: Modely šroubků FS1009

Sdružený nástroj:

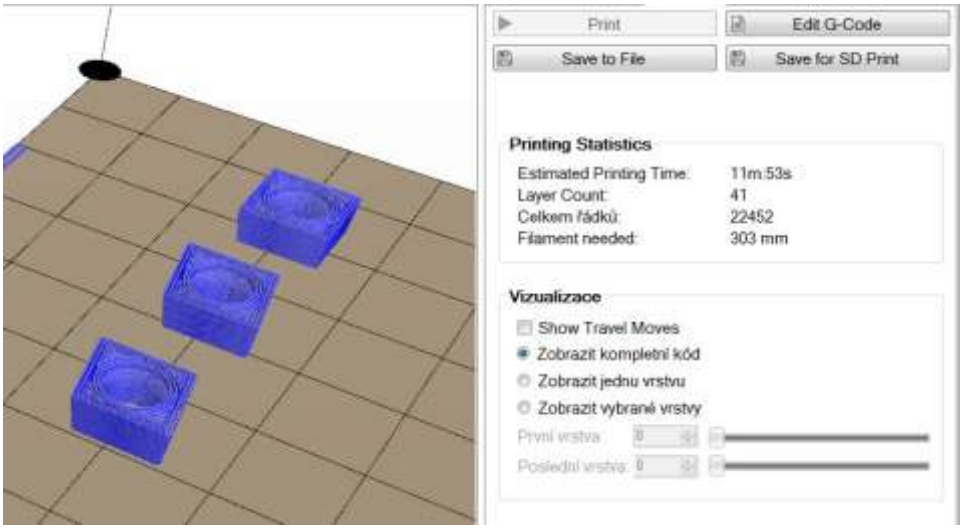
- tělo držáku bylo tištěno na dvě části (viz obrázky 28 a 29), aby se předešlo potřebě podpor, a tím byl povrch modelu řezného nástroje přesnější a kvalitnější;
- břitové destičky SCGT09T304 a CCGT09T304 byly tištěny najednou (viz obrázky 21 a 22), aby se zkrátila doba tisku;
- břitová destička špičky vrtáku P6004 (viz obrázek 27) byla tištěna s podpůrnou strukturou ze stejného materiálu;

Celkový čas výroby řezného nástroje a parametry tisku jednotlivých částí jsou uvedeny v tabulce 8.

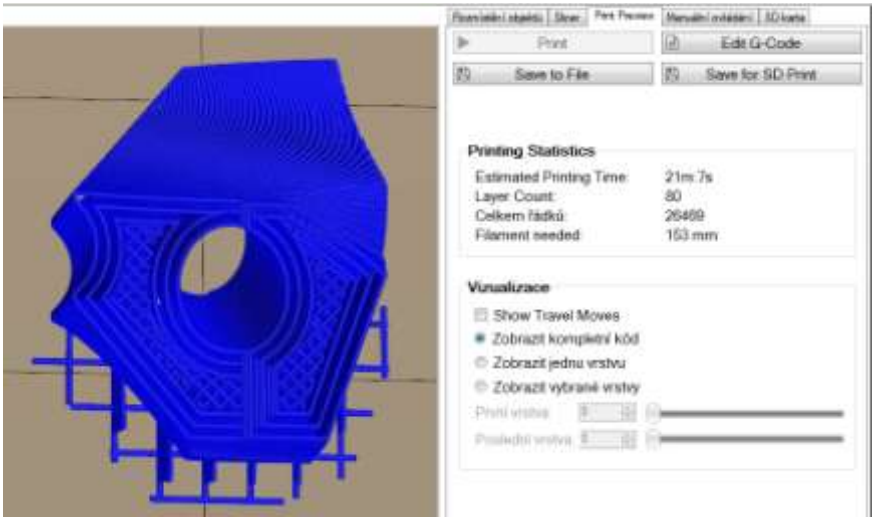
Tabulka 8: Parametry tisku sdruženého nástroje

	Doba tisku	Počet vrstev	Spotřeba mat.	Počet objektů
Destičky SCGT09T304-PF2	0:11:53	41	303 mm	2
Destička CCGT09T304-PF2				1
Destička P6004-D14,00R	0:21:07	80	153 mm	1
Držák – část 1	7:12:52	1057	9 743 mm	1
Držák – část 2	2:37:56	561	4 940 mm	1
Šroubek 1	0:22:03	180	198 mm	3
Šroubek 2	0:07:11	256	64 mm	1

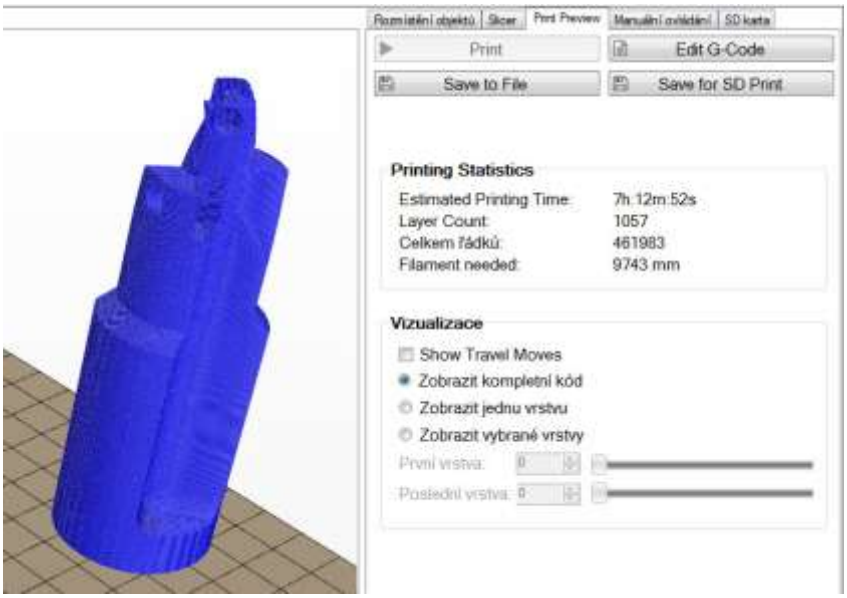
Příprava	0:50:00
Celkový čas výroby	11:43:02



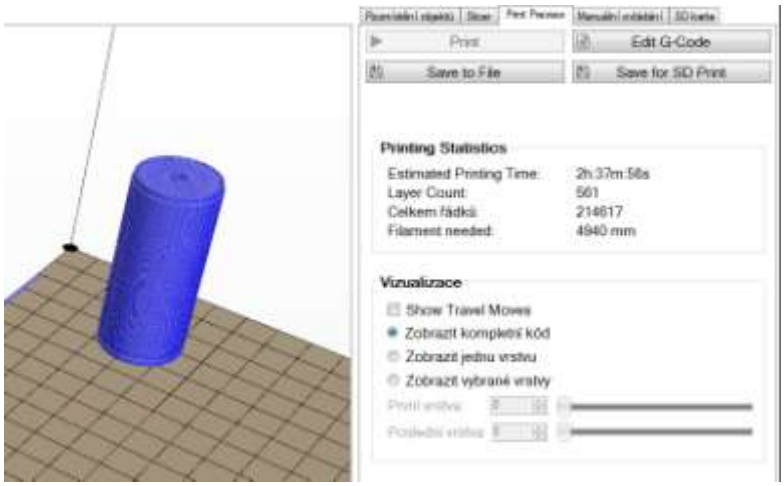
Obrázek 26: Model destiček SCGT09T304 a CCGT09T304



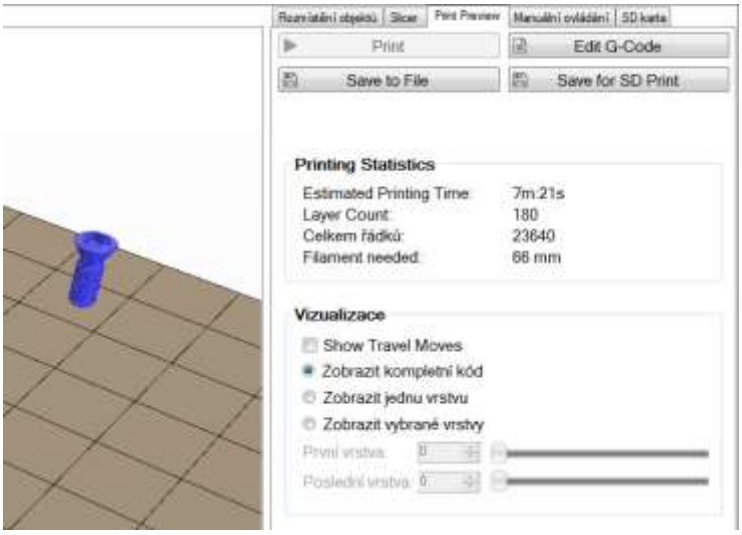
Obrázek 27: Model destičky P6004-D14, 00R



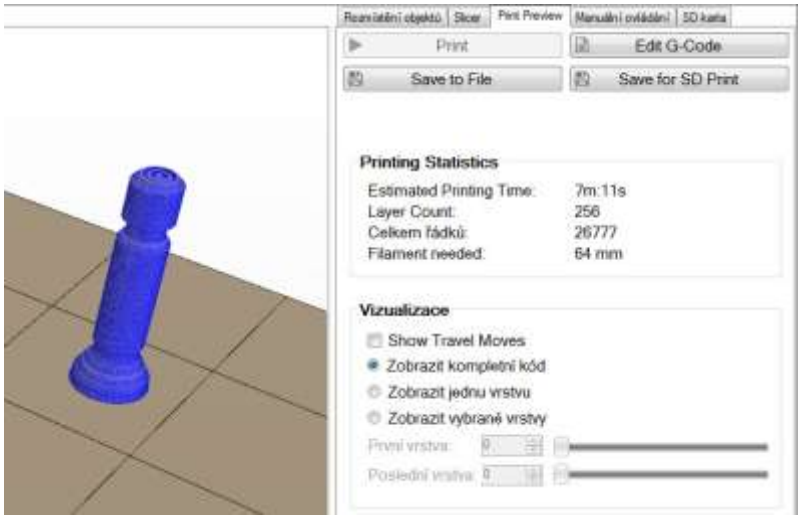
Obrázek 28: Model držáku – část 1



Obrázek 29: Model držáku – část 2



Obrázek 30: Model šroubku 1



Obrázek 31: Model šroubku 2

5. Dokončovací operace a povrchová úprava

Po vytištění všech součástí byly ručně odstraněny podpůrné struktury na destičce špičky vrtáku P6004 a podstavce, na kterých byly vytištěny šroubky. Jelikož se tiskly součásti odděleně, bylo nutné je slepit dohromady. Předtím, než se nástroj začne lepit, musel se odmastit lepený povrch.

Nejznámější a nejpoužívanější povrchovou úpravou je vyhlazování nad párou acetonu. Jelikož je tato metoda velmi časově a složitá, bylo použito natření povrchu acetonem pomocí štětce. Výsledky nebyly znatelné, pouze se povrch více leskl, ale stopy jednotlivých vrstev byly stále viditelné.

6 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit se blíže s problematikou aditivní výroby. Byl popsán rozdíl mezi aditivní výrobou a rychlým prototypováním a detailně byla popsána nejpoužívanější technologie FDM. Dále byl zpracován přehled tiskových materiálů a všech dostupných aditivních technologií. Dalším a hlavním cílem bylo vytvořit modely speciálních řezných nástrojů pro výukové a prezentační účely.

CAD modely řezných nástrojů (výkresy jsou uvedeny v přílohách A a B) poskytla firma Walter spolu s PLA materiálem a 3D tiskárnou MakerBot. Během tisku na tiskárně MakerBot vznikl problém při odlepování objektů od platformy a bohužel, s mými zkušenostmi a znalostmi této problematiky, se nepodařilo modely vytisknout. Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie poskytla k tisku modelů tiskárnu Felix 2.0, na které se odlepování modelů vyskytovalo pouze v ojedinělých případech, např. u šroubků. Tento problém se vyřešil pomocí podstavce, na který se šroubky umístily. Tím se zvětšila tištěná plocha a díly držely na platformě. Díky poskytnutí druhé tiskárny byly porovnány jejich tiskové vlastnosti, čímž se rozšířily mé poznatky z oblasti aditivní výroby.

Jelikož se modely nástrojů tiskly z více částí, byly po vytištění slepeny. Aby dostaly realističtější vzhled, bylo odzkoušeno natření povrchu acetonem pomocí štětce. Tento způsob nebyl příliš účinný. Model sice získal větší lesk, stopy po nanesených vrstvách však zůstaly stále viditelné. Doporučovala bych použít jiný roztok nebo jinou metodu, například vyhlazování nad parou acetonu – metoda však vyžaduje laboratorní a potřebné vybavení. Z tohoto důvodu bych se chtěla věnovat problematice povrchových úprav vytištěných modelů v magisterském navazujícím studiu.

Při zpracování teoretické části mně velmi zaujala technologie LOM, protože používá spojitou vrstvu papíru, a díky tomu je velmi levnou alternativou. Tištěné objekty mají podobné vlastnosti jako dřevo a mohou se brousit.

Výstupem této bakalářské práce jsou modely řezných nástrojů – frézovací hlavy a sdruženého vrtáku – které využije k prezentacím firma Walter a Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie při výuce.

Použitá literatura

[1] *Vat Polymerization* [online]. [cit. 2016-01-28]. Dostupné z: https://www.whiteclouds.com/3dpedia-index/vat-polymerization

[2] *3D Printing Processes: The Free Beginner's Guide* [online]. [cit. 2016-01-28]. Dostupné z: http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/processes/

[3] *Moving DLP* [online]. [cit. 2016-01-28]. Dostupné z: http://www.prodways.com/en/initial/moving-dlp/

[4] *3D Printing Process: Film Transfer Imaging (FTI)* [online]. [cit. 2016-01-28]. Dostupné z: http://www.3dsystems.com/media/3d-printing-process-fti

[5] *Lithoz: additive manufacturing technology* [online]. [cit. 2016-01-29]. Dostupné z: http://www.tctmagazine.com/euromold-news/lithoz-to-demonstrate-high-performance-ceramic-additive-manu/

[6] *LCM: Lithography-based Ceramic Manufacturing* [online]. [cit. 2016-01-29]. Dostupné z: http://www.lithoz.com/en/technology/lcm%E2%80%93technology/

[7] *The CeraFab 7500 3D Printer* [online]. 2012 [cit. 2016-01-29]. Dostupné z: http://www.3ders.org/articles/20121211-a-closer-look-at-innovative-high-accuracy-ceramic-3d-printer-cerafab-7500.html

[8] *About Additive Manufacturing* [online]. [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/whatisam/

[9] HODEK, Josef. *Aditivní technologie: Zpráva o stavu 3D tisku pro Českou technologickou platformu STROJÍTENSTVÍ, o. s.* 2013.

[10] 3D tiskový materiál [online]. [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: http://www.3dstruny.cz/Prodavane-materialy-a5_9.htm

[11] NARAYAN, R. *Rapid Prototyping of Biomaterials: Principles and Applications*. Copyright, 2014. ISBN 978-0-85709-599-2.

[12] *Fused deposition modeling (FDM)* [online]. 2015 [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_deposition_modeling#cite_note-3D-printing_PEEK-4

[13] *FFF VS. SLA VS. SLS: 3D PRINTING* [online]. 2013 [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: http://www.sd3d.com/fff-vs-sla-vs-sls/

[14] *3D Printing Materials:: The Free Beginner's Guide* [online]. 2014 [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/materials/

[15] *Navigating Through the Selection of 3D Printing Materials: Know Your Strengths!* [online]. [cit. 2016-02-19]. Dostupné z: http://3dprint.com/42417/3d-printing-material-strengths/

[16] *3D tiskové materiály – jak fungují* [online]. [cit. 2016-02-19]. Dostupné z: http://www.3dtiskarny.info/recenze/srovnani-3d-tiskovych-strun/

[17] *Anatomy of the SLS Process* [online]. [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: http://www.3dsystems.com/quickparts/learning-center/sls-anatomy

[18] *SLS Process* [online]. [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: http://creativesculpture.com/blog/2012/06/must-see-3d-printing-of-ceramic-and-diy.html

[19] *Selective heat sintering* [online]. 2014. [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_heat_sintering

[20] *Selective Heat Sintering rapid prototyping & (SHS) 3D printing services* [online]. [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: http://www.3dprinterpro.com/selective-heat-sintering-service/

[21] *Direct metal laser sintering* [online]. [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Direct_metal_laser_sintering

[22] SEKERKA, V. *Výroba dílů technologií DMLS a jejich porovnání s jinými konvenčními technologiemi z hlediska ekonomické náročnosti*. 2011. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

[23] *SLM (Selective Laser Melting) : 3D Printing Metal* [online]. [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: https://www.sculpteo.com/en/glossary/selective-laser-melting-definition/

[24] *Selective laser melting* [online]. 2015 [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_melting

[25] *Electron Beam Melting (EBM)* [online]. [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: https://www.additively.com/en/learn-about/electron-beam-melting#read-advantages

[26] *Make Metal Parts Faster & Cheaper Than Ever with Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM™) Systems or Services* [online]. [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology

[27] *DSM™ series of laser systems* [online]. [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: http://www.3geometry.com/products.html

[28] *Laser Metal Fusion (LMF)* [online]. [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: http://www.trumpf-laser.com/en/solutions/applications/additive-manufacturing/laser-metal-fusion.html

[29] *Crafting Complex Ceramic Implants With FCP Technology* [online]. 2011. [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: http://www.techbriefs.com/component/content/article/mdb/features/11332

[30] LEONARD, Shana. *Ceramics Process Enables Complex Shapes, Controlled Porosity in Implants* [online]. [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: http://www.qmed.com/mpmn/article/ceramics-process-enables-complex-shapes-controlled-porosity-implants

[31] *LENS Technology* [online]. [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: http://www.optomec.com/3d-printed-metals/lens-technology/

[32] DUTTA, B., S. PALANISWAMY, J. CHOI, L.J. SONG a J. MAZUMDER. *Additive Manufacturing by Direct Metal Deposition* [online]. 2011 [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: www.mbraun.com/images/201/POM%20Group.pdf

[33] Precision Manufacturing: A New Technology for Microdevice Fabrication. *Medical Electronics Manufacturing* [online]. Copyright, 2002 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: http://www.medicalelectronicsdesign.com/article/precision-manufacturing-new-technology-microdevice-fabrication

[34] *EFAB® Technology for Medical Devices: An Introduction* [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: http://www.ewp.rpi.edu/hartford/~streej/FWM/Project/References/

[35] *Electron Beam Freeform Fabrication* [online]. 2011 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: http://www.nasa.gov/topics/technology/features/ebf3.html

[36] *Electron-Beam Freeform Fabrication* [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: http://www.popular3dprinters.com/electron-beam-freeform-fabrication/

[37] PALERMO, Elizabeth. *What is Laminated Object Manufacturing?* [online]. 2013 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: http://www.livescience.com/40310-laminated-object-manufacturing.html

[38] *Cos'è una stampante 3D e come si può usare* [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: http://tuttoin1.it/cose-una-stampante-3d-e-come-si-puo-usare/

[39] *3D metal printing technology without the compromise* [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: http://fabrisonic.com/ultrasonic-additive-manufacturing-overview/

[40] *Ultrasonic Additive Manufacturing* [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: http://www.automateddynamics.com/article/thermoplastic-composite-basics/developmental-processes/ultrasonic-additive-manufacturing

[41] *Ultrasonic consolidation* [online]. 2014 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic_consolidation

[42] *Production Methods: What's the Difference Between Selective Laser Sintering, Direct Metal Laser Sintering, Laser Melting and LaserCusing?* [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: http://www.core77.com/posts/26457/production-methods-whats-the-difference-between-selective-laser-sintering-direct-metal-laser-sintering-laser-melting-and-lasercusing-26457

[43] *Laser Melting (LM)* [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: https://www.additively.com/en/learn-about/laser-melting

[44] *3D tisk-úvod* [online]. 2013 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: http://www.14220.cz/technologie/3d-tisk-uvod/

[45] *How to Smooth 3D-Printed Parts* [online]. 2014 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: http://machinedesign.com/3d-printing/how-smooth-3d-printed-parts

[46] BELL, Charles. *Maintaining and Troubleshooting Your 3D Printer*. 2014. ISBN 978-1-4302-6809-3.

[47] *What is 3D printing?* [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: http://3dprinting.com/what-is-3d-printing/

[48] *What is Binder Jetting?* [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: http://www.exone.com/Resources/Technology-Overview/What-is-Binder-Jetting

[49] *Material Jetting* [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialjetting/

[50] *Material Jetting* [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: http://www.me.vt.edu/dreams/material-jetting

[51] *Material Extrusion* [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialextrusion/

[52] *Powder Bed Fusion* [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/

[53] *Directed Energy Deposition* [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directedenergydeposition/

[54] GIBSON, I., D. ROSEN a B. STUCKER. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer, 2010. ISBN 978-1-4419-1119-3.

[55] *Stereolithography (SLA®)* [online]. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: http://www.3dsystems.com/resources/information-guides/stereolithography/sla

[56] *Additive Manufacturing* [online]. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: http://myobjectify.com/additive

[57] *Introduction to Structo MSLA Technology* [online]. 2016 [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: http://3dprintingindustry.com/2016/04/17/introduction-to-structo-msla-technology/

[58] *Additive Manufacturing Manufacturers links: Classification by Technology* [online]. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: http://rds077.blogspot.cz/2015/11/additive-manufacturing-manufacturers_26.html

[59] *Walter ve zkratce: Portrét společnosti* [online]. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: http://www.walter-tools.com/cs-cz/company/mission_facts/factbook/Pages/default.aspx

[60] *MakerBot Replicator Z18: User manual*. One MetroTech Center, 21st Floor, Brooklyn, NY: MakerBot.

[61] *MakerBot Replicator Z18: 3D Printer* [online]. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: http://store.makerbot.com/replicator-z18

[62] *3D tiskárna Felix 2.0* [online]. [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: http://www.nc.cz/3d-tiskarna-felix-2-0-stavebnice-modra_d22163.html

[63] *Walter AG Souhrnný katalog* [online]. 2012 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: http://www.waltertools.blaetterkatalog.de/gc2012/cz/#page_1

[64] *PLA Filament* [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: https://store.makerbot.com/filament/pla-large/

[65] *Makerbot Replicator Z18* [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: http://www.b3dgeable.com/3d-printers/makerbot-replicator-z18-6499/

[66] *Felix 2.0* [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: http://www.makerwise.com/3d-printer/felixprinters/felix-20/

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh:

Příloha A: Výkres frézovací hlavy F2007-6671490

Příloha B: Výkres sdruženého vrtáku B4073-6695147